

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА имени А. Н. БЕКЕТОВА**

**А. Н. ПЕТРЕНКО  
А. В. ДОНЕЦ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
по курсу**

# **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

*(для студентов 4 курса всех форм обучения, направления подготовки  
6.050702 – Электромеханика и слушателей второго высшего образования)*

**Харьков  
ХНУГХ им. А. Н. Бекетова  
2016**

**Петренко А. Н.** Конспект лекций по курсу «Специальные электрические машины» (для студентов 4 курса всех форм обучения, направления подготовки 6.050702 – Электромеханика и слушателей второго высшего образования) / А. Н. Петренко, А. В. Донец; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2016. – 116 с.

Авторы: А. Н. Петренко  
А. В. Донец

Рецензент: доц. В. П. Андрейченко

Рекомендовано кафедрой Электрического транспорта,  
протокол № 2 от 12 января 2014 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ...	7
1.1 Классификация тяговых электрических машин. Терминология. Определения. Назначение .....	7
1.2. Основные этапы развития отечественного и мирового электромашиностроения .....	8
1.3. Условия работы тяговых двигателей .....	9
2 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	11
2.1 Кинематические схемы тяговых передач .....	12
2.2 Элементы конструкции тягового двигателя .....	14
2.2.1 Элементы конструкции якоря .....	14
2.2.2 Сердечник якоря тягового двигателя .....	14
2.2.3 Коллекторный узел .....	15
2.2.4 Обмотка.....	16
2.3 Элементы конструкции остова .....	17
2.3.1 Остов тяговых двигателей .....	17
2.3.2 Главные и добавочные полюсы .....	17
2.4 Добавочные полюсы.....	18
3 ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ .....	19
3.1 Проводниковые материалы .....	19
3.2 Магнитные материалы.....	20
3.3 Электрическая изоляция .....	20
4 ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	21
<b>4.1 Номинальные и предельные данные тяговых двигателей</b> .....	21
4.2 Магнитные и нагрузочные характеристики тягового электродвигателя .....	21
4.3.Рабочие характеристики двигателей.....	25
4.3.1 Электромеханические характеристики.....	26
4.3.2 Электротяговые характеристики.....	26
4.4 Коэффициент полезного действия и потери в двигателе.....	27
5 ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ .....	30
6 КОММУТАЦИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	33
6.1 Критерии оценки качества коммутации.....	33
6.2 Коммутация при установившихся процессах .....	34
6.3 Электромагнитные причины искрения .....	37
6.4 Круговой огонь на коллекторе тяговых двигателей.....	37
6.5 Дополнительные полюсы и компенсация ими реактивной ЭДС .....	40
6.6 Потенциальные условия на коллекторе .....	42
6.7 Способы повышения потенциальной устойчивости .....	46

6.8. Компенсационная обмотка и ее влияние на потенциальные условия .....	47
6.9 Тяговые двигатели пульсирующего тока .....	52
6.10 Внешние способы сглаживания пульсации .....	54
6.11 Коммутация переменной составляющей тока .....	56
6.12 Переменная составляющая момента .....	57
6.13 Особенности коммутационного процесса двигателей пульсирующего тока.....	58
6.14 Определение переменной составляющей $e_{\text{кп}}$ .....	58
6.15 Компенсация реактивной ЭДС дополнительными полюсами двигателей пульсирующего тока.....	60
6.16 Способы улучшения коммутации тяговых двигателей пульсирующего тока.....	62
6.16.1 Шихтовка дополнительного полюса и применение компенсационной обмотки .....	62
6.16.2 Снижение переменной составляющей остаточной ЭДС за счет компенсационной обмотки .....	62
6.17 Неустановившиеся процессы в цепи тяговых двигателей .....	64
6.18 Влияние вихревых потоков в магнитопроводах на протекание переходных процессов .....	65
6.19 Влияние индуктивности обмоток тяговых машин на переходные процессы .....	67
6.20 Влияние параметров внешних цепей на переходные процессы.....	68
6.21 Мероприятия, направленные на облегчение протекания переходных процессов .....	70
<b>7 НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН .....</b>	<b>71</b>
7.1 Допустимые превышения температур .....	71
7.2 Классическая теория нагревания однородного твердого тела .....	72
7.3 Расчет нагревания обмотки якоря.....	75
7.4 Вентиляция тяговых двигателей.....	77
7.5 Самовентилирующиеся машины .....	78
7.6 Независимая вентиляция.....	79
7.7 Расчет вентиляции тяговых электрических машин.....	80
<b>8 ТЯГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....</b>	<b>82</b>
<b>9 ВЕНТИЛЬНЫЕ ТЯГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ .....</b>	<b>83</b>
<b>10 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ .....</b>	<b>88</b>
10.1. Формы фазных токов и напряжений .....	88
10.2. Моменты от высших временных гармоник тока и потока одного порядка	91
10.3 Коэффициент мощности и КПД .....	92
10.4 Принцип регулирования асинхронного тягового двигателя .....	93
10.5 Статическая устойчивость асинхронных тяговых двигателей.....	98
10.6 Особенности конструкции асинхронных тяговых двигателей.....	99

11 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ .....	101
12 ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ И МАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ .....	103
12.1 Назначение вспомогательных машин .....	103
12.2 Особенности конструкции вспомогательных машин ЭПС постоянного тока.....	103
12.3 Вспомогательные машины ЭПС переменного тока .....	104
12.4 Моторы-вентиляторы.....	105
12.5 Моторы-компрессоры .....	106
12.6 Моторы-насосы .....	107
12.7 Расщепители фаз .....	107
12.8 Моторы-генераторы и генераторы управления.....	108
12.9 Делители напряжения .....	109
13. ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	109
13.1 Нагрузка испытуемых машин и стенды для их испытаний .....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	114
<b>СПИСОК ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>115</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно программе по дисциплине «Специальные электрические машины» студент, изучивший указанный курс, должен получить теоретические знания и практические навыки.

Студент должен знать:

- 1) теорию работы тяговых электрических машин;
- 2) принципы расчета тяговых электрических машин;
- 3) условия эксплуатации тяговых электрических машин;
- 4) влияние свойств и характеристик тяговых электрических машин (ТЭМ) на производительность электроподвижного состава (ЭПС);
- 5) достижения в области создания ТЭМ и передовой опыт их ремонта.

Студент должен уметь:

- 1) организовать обслуживание и ремонт тяговых электрических машин;
- 2) проводить испытания ТЭМ;
- 3) выполнять расчеты элементов ТЭМ;
- 4) рассчитывать режимы работы ТЭМ.

Учебное пособие написано для того, что бы помочь студенту специальности «Электрический транспорт» овладеть этими знаниями.

# 1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

## 1.1 Классификация тяговых электрических машин. Терминология. Определения. Назначение

**Тяговыми электрическими машинами (ТЭМ)** называют электрические машины, предназначенные для работы в качестве двигателей, генераторов, преобразователей на подвижном составе всех видов.

Тяговые электрические машины классифицируются:

1) по назначению: на тяговые электродвигатели; тяговые генераторы; вспомогательные машины;

2) по роду тока: на постоянного тока (пульсации тока не превышают 10 %); пульсирующего тока; коллекторные машины однофазного переменного тока промышленной и пониженной частоты; асинхронные машины переменного трехфазного (или многофазного) тока;

3) по способу защиты от внешних воздействий: на защищенные; брызгозащищенные; закрытые;

4) по способу охлаждения: с независимой вентиляцией; с самовентиляцией; обдуваемые; с естественным охлаждением;

5) по виду возбуждения: с независимым возбуждением; с параллельным возбуждением; с последовательным возбуждением; со смешанным возбуждением.

**Тяговым электродвигателем (ТЭД)** называется электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую работу, затрачиваемую на работу подвижного состава. В настоящее время на электроподвижном составе (ЭПС) применяют в основном тяговые двигатели постоянного и пульсирующего тока. Однако есть пробные шаги к созданию электровозов с асинхронными и вентильными двигателями.

**Вспомогательными машинами** называют электродвигатели, служащие для привода компрессоров, обеспечивающих питание сжатым воздухом тормозных систем и электропневматических приводов тяговых аппаратов, вентиляторов; расщепители фаз; делители напряжения; генераторы служебного тока; двигатель-генераторы.

Мотор-вентиляторы используются для охлаждения тяговых двигателей и выпрямительных установок.

Расщепители фаз предназначены для преобразования однофазного тока в трехфазный, которым питают асинхронные двигатели других вспомогательных машин.

**Делители напряжения** (двухколлекторные машины) делают для питания двигателей других вспомогательных машин с напряжением, вдвое меньшим напряжения контактной сети.

**Генераторы служебного тока** предназначены для получения электроэнергии напряжением 50...1100 В для питания цепей управления и сигнализации.

*Двигатель-генераторные агрегаты возбуждения* применяют на ЭПС для питания обмоток возбуждения в период электрического торможения.

Для того чтобы представлять себе пути развития тягового электромашиностроения необходимо сделать краткий экскурс в историю развития тягового электропривода.

## 1.2 Основные этапы развития отечественного и мирового электромашиностроения

В 1876 году в Петербурге инженер А. Пироцкий провел опыты по электрификации трамвая.

В 1881 году была электрифицирована первая линия трамвая в Германии.

1891 год такая же линия электрифицирована в России и (Севастополь).

1895 год в США электрифицирована пригородная линия.

И везде использовались тяговые двигатели постоянного тока напряжением 500...750 В.

В конце 90-х годов на севере Италии был электрифицирован участок железных дорог на 3000 В с пониженной частотой  $16^{2/3}$  Гц. Двигатели использовались трехфазного тока. Эти двигатели были многополюсными, тяжелыми и дорогими. Однако уже тогда предусматривалась возможность рекуперативного торможения.

С начала XX века в Германии, Швеции, США началась электрификация на однофазном токе 11...15 кВ, но частоты были низкими –  $16^{2/3}$  Гц, (США – 25 Гц). Двигатели при этом снабжались редукторами.

В то же время во Франции, была начата электрификация на постоянном токе 1500 В. Для этих линий был построен однофазно-трехфазный электровоз.

В Венгрии в 20-х годах XXI века была проведена электрификация линий 16 кВ и частотой 50 Гц с использованием преобразовательных электровозов (однофазно-трехфазных). Двигатели использовались тихоходные с переключением числа пар полюсов.

В начале 50-х годов прошлого века во Франции был электрифицирован участок 22...25 кВ. На этой линии были успешно апробированы электровозы с асинхронными двигателями и частотным регулированием.

В 70-х годах прошлого века в США электрифицировалась линия на 25 Гц напряжением 50 кВ.

Сейчас ведутся научные работы в области создания линейных асинхронных двигателей для скоростей движения 500...600 км/ч.

Первым заводом, изготавливающим отечественные двигатели, был завод «Электрик» в Ленинграде. В 1924 году на нем был создан двигатель для первого электровоза (110 кВт, 660 об/мин).

В этом же году на заводе «Электросила» были построены трамвайные двигатели (50 кВт, 560 об/мин,  $U = 550$  В).



С 1928 года все тяговое электромашиностроение сосредоточилось на заводе «Динамо» в Москве.

В 1929 году был выпущен двигатель мощностью 340 кВт и частотой вращения 650 об/мин.

В 1934 году был сделан сдвоенный тяговый двигатель мощностью 2×340 кВт и частотой вращения 650 об/мин.

В послевоенные годы, набрали силу Новочеркасский и Тбилисский локомотивостроительные заводы (НЭВЗ и ТЭВЗ), которые до настоящего времени выпускают электровозы переменного и постоянного тока. При этом мощности тяговых двигателей непрерывно росли и теперь мощности тяговых двигателей электровозов находятся в диапазоне 800...900 кВт и выше. Мировой уровень – это 1000 кВт и даже несколько выше.

В таблице 1.1 представлены сравнительные данные тяговых двигателей, позволяющие оценить современный уровень развития электродвигателей в России и других странах.

*Таблица 1.1*

### **Основные показатели тяговых двигателей**

Тип двигателя и страна изготовитель	Год выпуска	Мощность Р <sub>НОМ</sub> , кВт	Масса М <sub>Д</sub> , кг	Удельные показатели	
				М <sub>Д</sub> / Р <sub>НОМ</sub>	М <sub>Д</sub> / М <sub>НОМ</sub>
Постоянный ток					
НБ 500В (СССР)	1980	800	4600	5,75	0,44
Т– 750 ФС (Италия)	1975	1125	5000	4,4	0,45
AL-4846 (ЧССР)	1981	618	5000	8,1	0,61
Переменный ток					
НБ-507 (СССР)	1976	1000	2873	3,0	0,30
LjH-108-3 (Швеция)	1976	1000	2873	3,0	0,30

Анализ этой таблицы даёт возможность судить о двигателях нашей страны как не уступающих лучшим мировым образцам.

### **1.3. Условия работы тяговых двигателей**

Значительное влияние на работу двигателя оказывают нагрузки.

Условия эксплуатации таковы, что ток тягового двигателя ежеминутно меняется, при этом меняется и частота вращения. При этом и тот, и другой показатель могут как длительное время сохранять постоянство значений, так и резко изменяться (рис. 1.1).

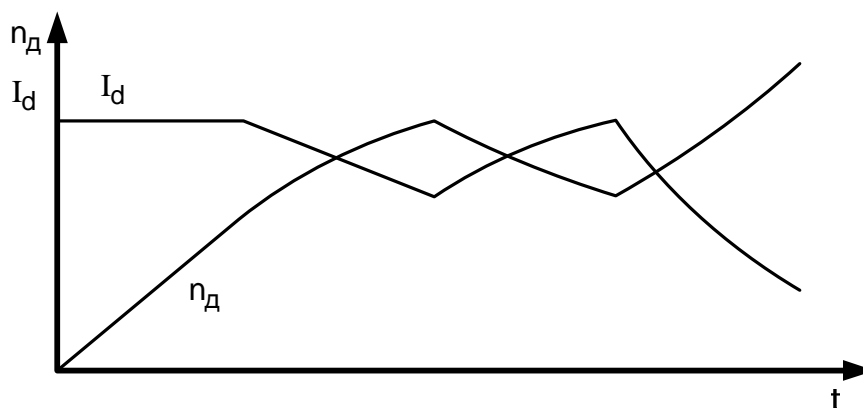


Рисунок 1.1 – Пример формы тока и частоты вращения двигателя электровоза в процессе эксплуатации

В электроподвижном составе токовые нагрузки более стабильны (рис. 1.2), и из-за сравнительно больших режимов выбега в целом двигатели электропоездов перегреваются меньше.

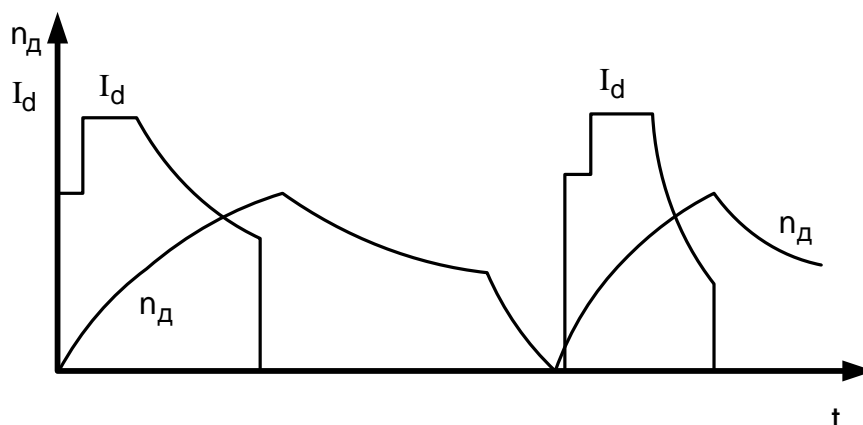


Рисунок 1.2 – Пример формы тока и частоты вращения двигателя тепловоза в процессе эксплуатации

Сложна работа двигателей и по напряжению. Изменение напряжения по ГОСТ 6962–75 может заключаться в следующих пределах:

- постоянный ток 300...4000 В;
- переменный ток 220...2900 В.

Климатические условия также осложняют работу тяговых двигателей. По ГОСТ 2582–81 двигатели должны работать от +40 до –60 °С. Такие резкие перепады температур могут привести к износу изоляции, её быстрому старению и т. д.

В настоящее время в основном используются три класса изоляции (В; F; H) с различным превышением температуры. Говоря о воздействиях на тяговый двигатель, нельзя не остановиться на динамических воздействиях.

В соответствии с ГОСТ 2582–81 электрические машины должны быть рассчитаны на работу в условиях вибрации и ударов, достигающих

ускорения  $150 \text{ м/с}^2$ . Результирующее ускорение для различных видов подвешивания составляет:

- опорно-осевое –  $212 \text{ м/с}^2$ ;
- опорно-рамное –  $30 \text{ м/с}^2$ .

Все эти удары сказываются и на креплении деталей двигателя, и на качестве токосъема.

Тяговые двигатели должны быть защищены от воздействий пыли и грязи. Исполнение тяговых двигателей занимает промежуточное положение между закрытым и защищенным исполнениями, они закрыты от соприкосновения с электрическими частями, но не защищены от влаги и пыли.

Однако, несмотря на сложные условия эксплуатации, в последние годы удалось повысить надежность тяговых двигателей и увеличить их межремонтные пробеги. Это получено за счет:

- разработки и внедрения компенсационной обмотки;
- повышения технологического уровня производства;
- применения электротехнической стали, 2212 вместо стали 1312 (это позволило уменьшить массу);
- использования стеклослюдинитовой ленты вместо миколенты, что позволило повысить электрическую прочность, влагостойкость, непроводность и механическую стойкость.

Увеличить показатели позволили следующие меры:

- совершенствование механических элементов конструкции (подшипниковые щиты, межкатушечные соединения);
- совершенствование изоляционных конструкций и материалов.

Готовится проект нового электровоза с асинхронными двигателями.

## 2 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Тяговый двигатель является электрической машиной, встроенной в тележку ЭПС. Это обстоятельство накладывает определенный отпечаток на его габариты и конструкцию, в том числе на вид подвешивания тягового двигателя в тележке.

Различают два вида подвешивания:

- опорно-осевое;
- опорно-рамное.

В первом случае двигатель одной из своих сторон посредством моторно-осевых подшипников опирается на вал оси колёсной пары, а второй стороной посредством резинометаллических блоков – на раму тележки.

При опорно-рамном подвешивании, весь двигатель крепится к раме тележки, естественно, через систему подвешивания, позволяющую погасить воздействия пути на него.

Схематично крепление двигателя при опорно-осевом подвешивании показано на рисунке 2.1.

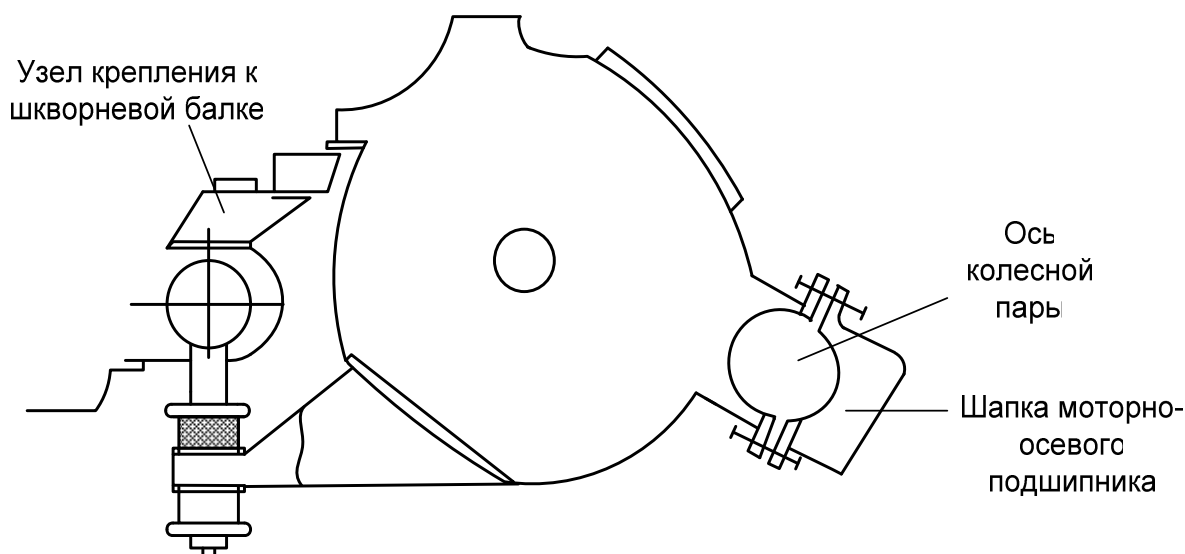


Рисунок 2.1 – Схема крепления двигателя при опорно-осевом подвешивании

Схема крепления и передачи момента при опорно-рамном подвешивании зависит от системы передачи этого момента. Из рисунка видно, что двигатель при опорно-осевом подвешивании одной стороны опирается на ось колесной пары и воспринимает все усилия переданные от пути. При этом ускорения достигают  $21g$ .

Если двигатель полностью подрессорен, как при опорно-рамном подвешивании, то ускорение всего лишь  $3g$ .

При опорно-осевой подвеске конструкция передачи чрезвычайно проста, но зато такой тип подвески требует повышения механической прочности элементов тягового двигателя, и при этом снижается надежность токосъема.

При рамном подвешивании конструкция существенно усложняется. Необходимость расположения во внутренней полости якоря шарнирной муфты требует увеличения диаметра якоря. Затруднена смазка и ревизия. Поэтому опорно-рамное подвешивание применяют лишь для скоростей движения более 120 км/час и на метрополитене, чтобы снизить шум.

Рассмотрим кинематические схемы тяговых передач.

## 2.1 Кинематические схемы тяговых передач

Наиболее простой является передача при опорно-осевом подвешивании. Она, как правило, двухсторонняя или односторонняя. Схематично эти передачи показаны на рисунке 2.2.

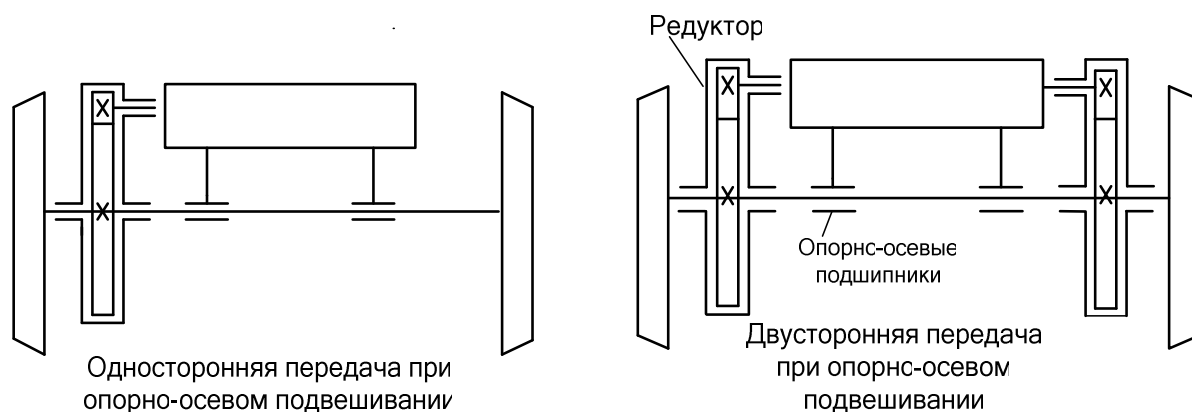


Рисунок 2.2 – Схема опорно-осевого подвешивания тяговых двигателей

При двусторонней передаче редуктор делают из косозубых шестерней и колес для обеспечения равномерности передачи момента. Кроме того, необходимо обеспечить радиальное перемещение якоря на 8...10 мм.

Передача при опорно-рамном подвешивании изображена на рисунке 2.3.

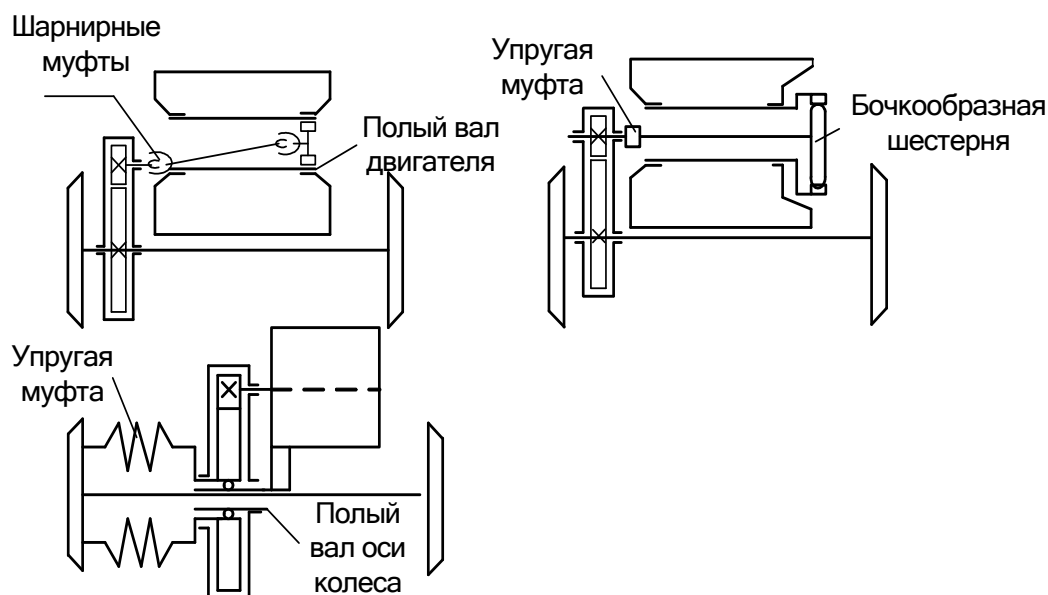


Рисунок 2.3 – Схема опорно-рамного подвешивания тяговых двигателей

Очень редко применяют еще один способ привода – групповой, когда один тяговый двигатель приводит во вращение несколько колесных пар, но редуктор в этом случае громоздок, дорог и сложен.

Рассмотрев кинематические схемы тяговых передач, остановимся на элементах конструкции якоря, в особенности на тех, которые имеют место практически на всех тяговых двигателях.

## 2.2 Элементы конструкции тягового двигателя

### 2.2.1 Элементы конструкции якоря

В данном пункте мы коротко остановимся на основных элементах конструкции, не вдаваясь значительно в подробности. Это объясняется тем, что при выполнении курсового проекта необходимая информация будет изучаться дополнительно и рассматриваться каждый (или большинство) элемент тягового двигателя.

Вал якоря тягового двигателя служит для соединения всех деталей якоря и как несущая конструкция этих деталей, а также для передачи вращающего момента от двигателя через шестерню к зубчатому колесу (рис. 2.4).

Остальные проточки предназначены для насадки других узлов тягового двигателя и при различных конструкциях могут изменяться. Обычно это посадочные поверхности под подшипниковые крышки (щиты), лабиринтные кольца и т.д. Жесткость вала должна быть такой, чтобы максимальные нагрузки (в том числе и электрические) не приводили к прогибу и якорь, насаженный на вал, не задевал за полюса. Шероховатость посадочных поверхностей должна быть не ниже 7-го класса.

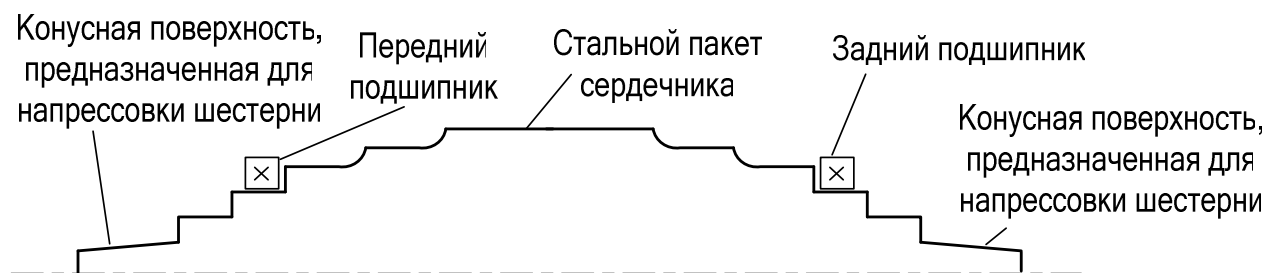


Рисунок 2.4 – Схематичное изображение вала тягового двигателя

Для придания валу необходимой прочности все изменения его диаметра выполняются плавно без кольцевых выточек и шпоночных канавок.

### 2.2.2 Сердечник якоря тягового двигателя

Сердечник якоря тягового двигателя служит для передачи магнитного потока, крепления обмотки и является одной из важнейших деталей тягового двигателя.

Обычно сердечник набирают на втулку. Если диаметр якоря меньше 350 мм ( $D_{\text{я}} < 350 \text{ мм}$ ), то возможна напрессовка непосредственно на вал, но в этом случае затруднена смена вала.

Сердечник якоря выполняется из наборных пластин, которые напрессовываются на втулку якоря, а затем вместе с втулкой надевается на вал якоря, образуя с ним и коробкой якоря единую конструкцию. Внешний вид листа якорного пакета представлен на рисунке 2.5.

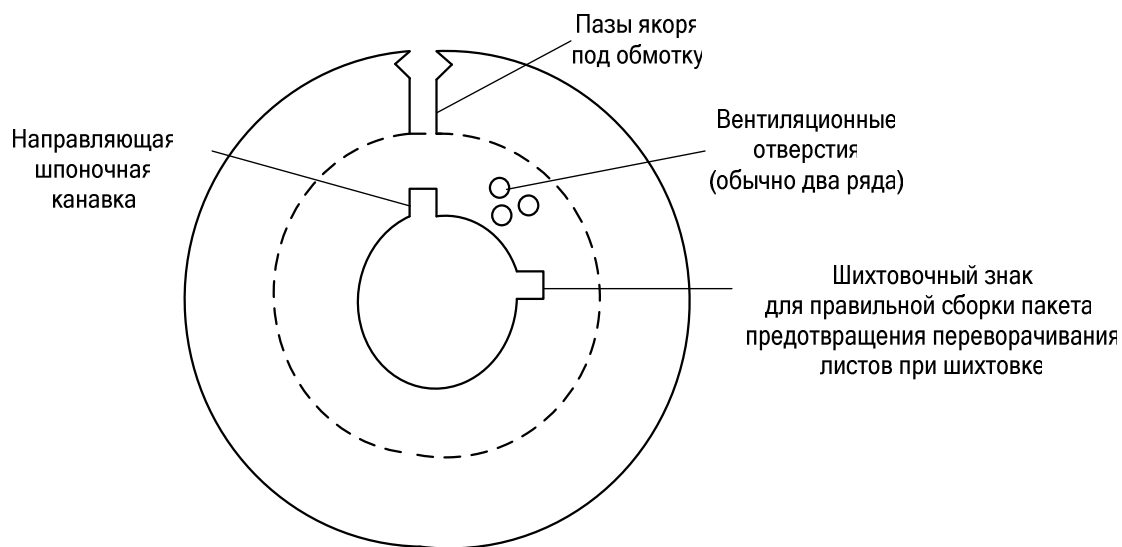


Рисунок 2.5 – Лист якоря тягового двигателя

Для предотвращения распушения, крайние листы выполняют из стали толщиной 1 мм и скрепляют сваркой. Пазы шлифуют, и в них с краёв, во избежание перетирания изоляции, вставляют изоляционные гильзы.

### 2.2.3 Коллекторный узел

Коллектор – это устройство электромеханической коммутации.

Коллектор очень нагруженное устройство и у современных машин находится на пределе использования возможностей материалов и технологии.

Каждая коллекторная пластина соединена с соответствующей секцией обмотки якоря. Пластин обычно более 300.

В тяговых двигателях, как правило, применяют коллекторы арочного типа. Пластины коллектора медные, трапецеидальные, изолированные друг от друга миканитовыми прокладками. Внешний вид коллекторной пластины и её крепление можно представить, как показано на рисунке 2.6.

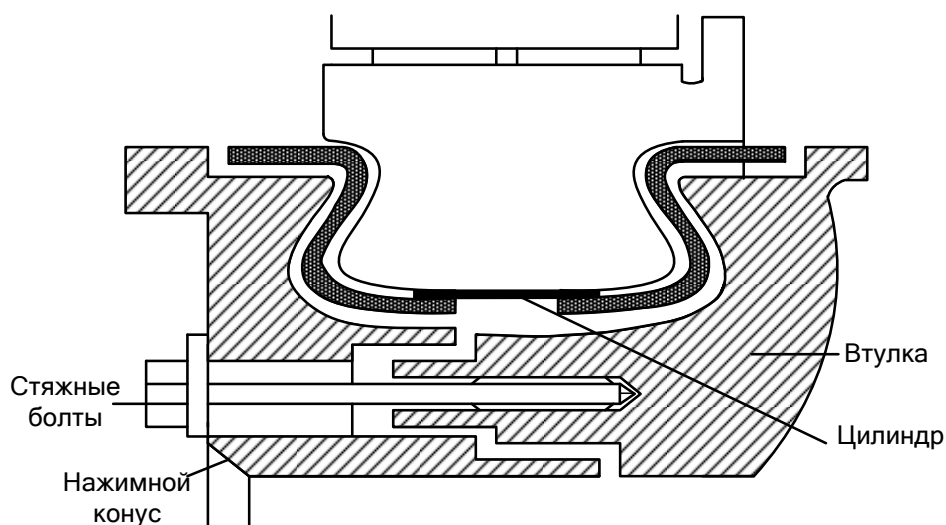


Рисунок 2.6 – Конструкция коллектора

Вся конструкция образует коллектор, и его втулка насажена на втулку якоря.

Для изоляции стяжного конуса и втулки от коллекторных пластин используются миканитовые манжеты и цилиндр. Коллектор требует особой тщательности при сборке. Биение рабочей поверхности коллектора должно быть не более 0,04 мм. Поэтому коллектор опрессовывается и одновременно стягивается болтами. При этом между пластинами образуется боковое давление – арочный распор, из-за чего возникающие силы трения препятствуют смещению пластин относительно друг друга. После сборки, коллектору делают продорожку, чтобы исключить затягивание межламельных промежутков медью и снять заусеницы, предотвратив слом щеток и нарушение коммутации.

#### 2.2.4 Обмотка

Проводники, уложенные в пазах якоря и соединенные с коллекторными пластинами, образуют обмотку якоря.

В тяговых двигателях обмотка выполняется в виде секций или катушек. Такая секция содержит несколько проводников из прямоугольной меди. По виду соединения между собой и укладке катушки делятся на волновые, петлевые и «лягушечьи» (рис. 2.7).

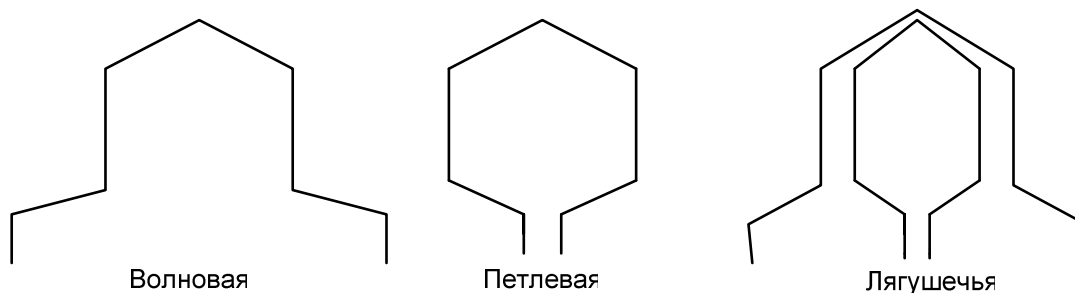


Рисунок 2.7 – Виды обмоток тягового двигателя

Для тяговых двигателей применяют обычно волновую и петлевую обмотки. Причем волновую обмотку применяют для двигателей мощностью примерно до 500 кВт. Обмотки тяговых двигателей специальным образом изолируют. Различают три основных вида изоляции: витковую; корпусную; покровную.

**Витковая изоляция** во всех двигателях выполняется стеклослюдинитовой лентой, в один слой (каждый проводник).

**Корпусная изоляция** является основной, эта изоляция пакета проводников. Её толщина определяется величиной напряжения и видом материалов. Между секциями вставляется (если они в одном пазу) изоляционная прокладка.

**Покровная изоляция** – это самый верхний слой изоляции в пазу – служит для защиты секций от механических повреждений. Крепление секции в пазу осуществляется клиньями. Обычно это секционированные текстолитовые или буковые клинья (в последнее время используются редко). Передние и задние

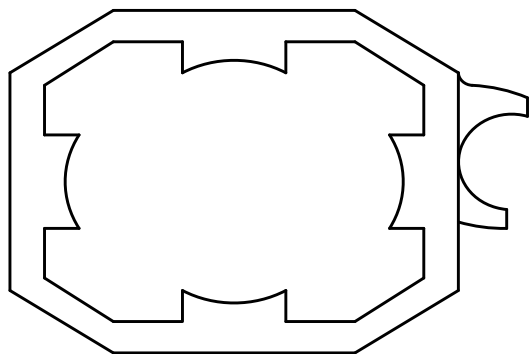


лобовые вылеты обмоток бондажируются. Это может быть либо металлический, либо не металлический бандаж.

## 2.3 Элементы конструкции остова

### 2.3.1 Остов тяговых двигателей

Остов тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока является магнитопроводом и одновременно несущим корпусом для подшипниковых щитов и полюсной системы. Как правило, остов выполняется литым из стали 25Л.



Его толщина выбирается исходя из необходимой магнитной индукции. Внешний вид остова тягового двигателя представлен на рисунке 2.8.

Длина остова равна 1,5-кратной длине главного полюса. Там, где магнитный поток не проходит, толщина остова на 15...20 мм меньше. С наружной стороны имеются приливы для крепления моторно-осевых подшипников, люков и т. д. К внутренней поверхности крепятся главные и добавочные полюсы. У 4-полюсных

Рисунок 2.8 – Вид остова тягового двигателя

машин делаются специальные приливы с внутренней стороны для крепления полюсов, так как остов не является круглым.

Со стороны коллектора имеется вентиляционный люк, а также люк для регламентных работ с коллекторно-щёточным аппаратом.

### 2.3.2 Главные и добавочные полюсы

Сердечники главных полюсов выполнены из штампованных листов малоуглеродистой стали. Технология изготовления и набора приблизительно такая же, как и сердечника якоря, конечные листы сваривают на точечную сварку.

У машин с компенсационной обмоткой на главных полюсах выполнены пазы для её укладки.

Главные полюсы крепятся к остову и удерживают обмотку возбуждения.

Вид главного полюса показан на рисунке 2.9.

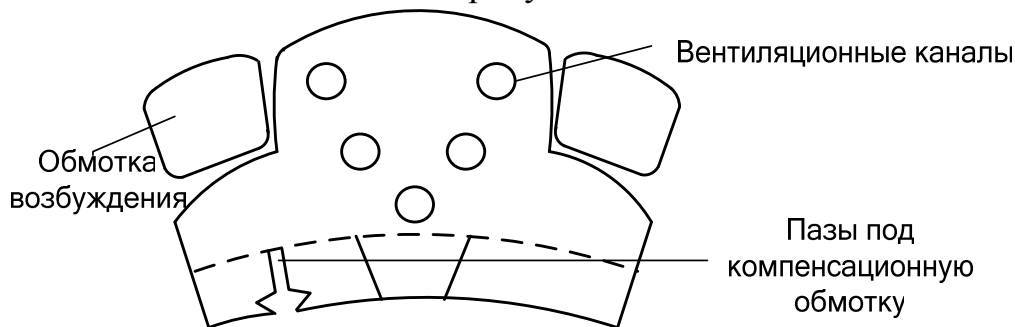


Рисунок 2.9 – Вид главного полюса

В тяговых двигателях катушки главных полюсов выполняют из шинной прямоугольной меди, в основном наматываемой на ребро.

Межвитковую изоляцию выполняют в зависимости от необходимого класса изоляции F или H. Есть некоторые отклонения при выполнении катушек главных полюсов двигателей последовательного и независимого возбуждения. У последних обмотка многовитковая, а ток в 3...5 раз меньше, чем ток якоря.

Соединительные кабели применяются повышенной нагревостойкости.

Компенсационные катушки изготавливают отдельно, и готовые секции вкладывают в пазы главных полюсов.

Расчет параметров катушек главных полюсов будет выполняться в курсовом проекте, поэтому нет необходимости на этом останавливаться в лекционном курсе.

Катушки обмоток возбуждения производят тремя способами:

- в моноблочном исполнении;
- с монолитной изоляцией;
- с немонолитной изоляцией.

В первом случае катушку вместе с главным полюсом заливают компаундом и сушат в печах.

Во втором случае катушку после компаунда сушат отдельно. В немонолитном исполнении катушку пропитывают термопластичным компаундом.

Для улучшения крепления катушки между ней и полюсом вставляют волнообразную прокладку, которая сжимает катушку. Крепление главных полюсов к остову осуществляется болтами с пружинными шайбами (рис. 2.10).

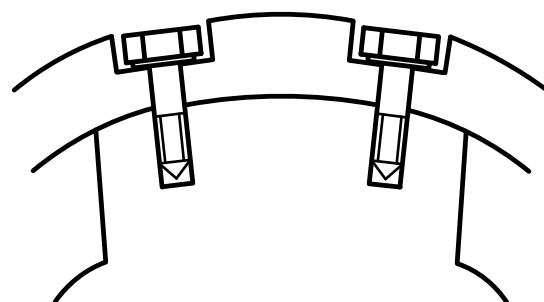


Рисунок 2.10 – Вид крепления главного полюса

## 2.4 Добавочные полюсы

Добавочные полюсы устанавливаются между главными полюсами и служат для улучшения условий коммутации.

В современных тяговых двигателях пульсирующего тока сердечники выполняют набором из листов электротехнической стали.

Для двигателей постоянного тока сердечники выполняют цельными из стального проката. Иногда между остовом и сердечником добавочного полюса делают диамангнитную прокладку.

Катушка добавочных полюсов наматывается на узкое ребро. Изоляция витков и катушки в целом аналогична изоляции катушки главных полюсов. Внешний вид добавочного полюса показан на рисунке 2.11.

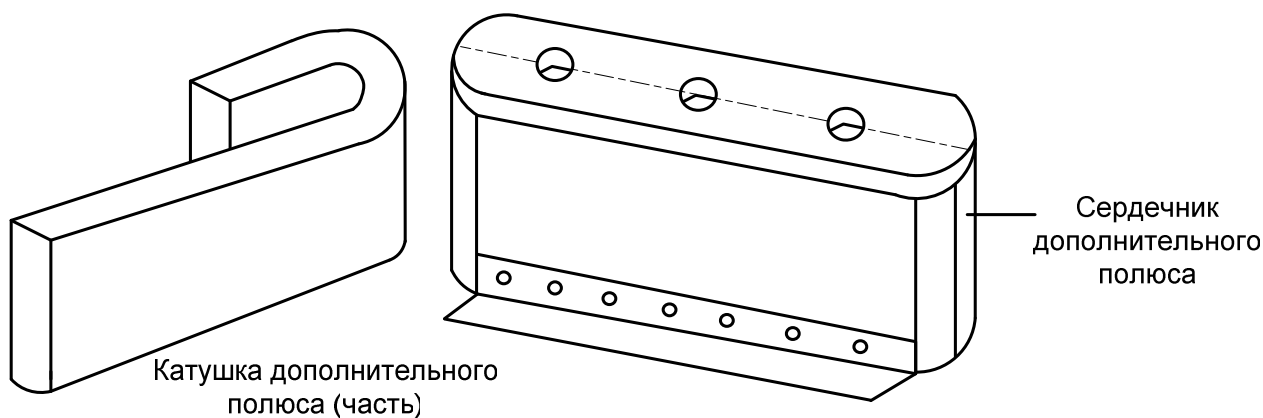


Рисунок 2.11 – Дополнительный полюс тягового двигателя

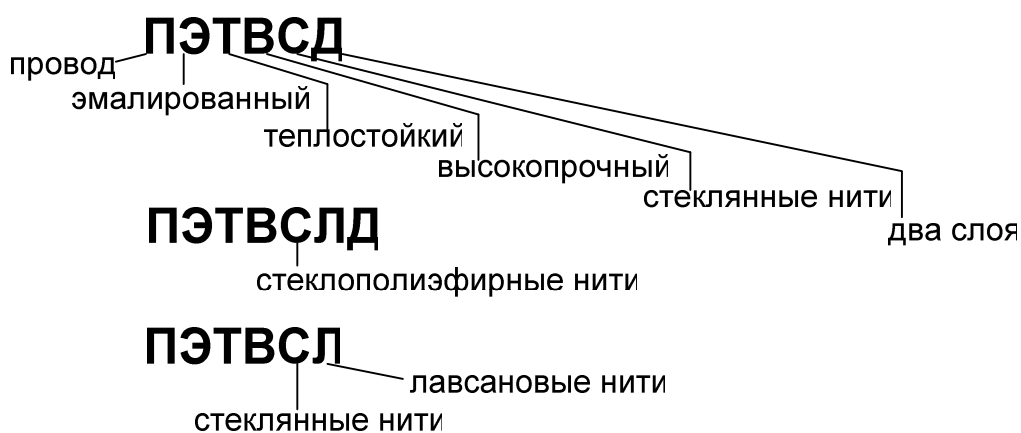
### 3 ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

#### 3.1 Проводниковые материалы

В качестве проводникового материала используют, как правило, медь. Для изготовления обмоток применяют проволоку, ленту и медные шины.

Используют следующие типы проводов:

- для класса нагревостойкости В и F



- для класса нагревостойкости Н



Цифры 1, 2, 3 соответствуют толщине изоляции 0,23; 0,3; 8,35.

Для изготовления коллекторов используется медь с присадкой серебра или кадмия. Это обеспечивает качество коммутации за счет образующейся пленки.

### 3.2 Магнитные материалы

Как уже ранее говорилось, магнитопроводы изготавливают из стального литья, электротехнической и листовой стали.

Электротехническая сталь марок 2212, 2213, 2214.

Характеристики этих сталей – толщина 0,5 мм, при индукции 1,5 Тл. и частоте перемагничивания 50 Гц потери составляют:

- сталь 2212 –  $\leq 5$  Вт/кг;
- сталь 2213 –  $\leq 4,5$  Вт/кг.

Обычно до или после штамповки сталь покрывают электроизоляционными материалами.

### 3.3 Электрическая изоляция

Уже говорилось о трех классах изоляции В, Н, F – эти классы разделены по нагревостойкости (табл. 3.1).

*Таблица 3.1 – Характеристика классов изоляции*

Класс изоляции	В	F	Н
Температура обмотки, С°	120/130	140/155	160/180
Температура коллектора, С°	95	95	105

К классу В относятся материалы на основе слюдинитов и эпоксидно-полиэфирных компаундов.

Обычная маркировка ЛСК-10-СПл:



К классу F относятся ленты на основе эпоксидно-полиэфирного лака ЭП-934. Сама лента слюдинитовая.

К классу Н относится асбестная бумага толщиной от 0,2 до 1 мм, миканиты, полиамидная пленка.

## 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### 4.1 Номинальные и предельные данные тяговых двигателей

Номинальными, определяющими, параметрами тяговых машин называют ток, мощность и КПД соответствующие определенному режиму работы, установленному стандартом.

Для тяговых машин таких режимов два: часовой и длительный.

**Часовой режим** – это режим работы двигателя с таким током на испытательном стенде в течение одного часа, с возбуждением, предусмотренным для этого режима и нормально действующей вентиляцией, который не вызывает превышения температуры его частей над температурой окружающего воздуха выше норм, установленных для данного класса изоляции.

**Длительный режим** – определяется наибольшим током так же, как и часовой, но при работе двигателя на испытательном стенде в течение неограниченного времени. Номинальными для электровоза считаются параметры длительного режима:

$$I_{\infty}, P_{\infty}, n_{\infty}, \eta_{\infty}.$$

Номинальные данные тяговых двигателей приводят на специальных табличках, которые укрепляются на несъемной части тягового двигателя. В них указывают:

- 1) товарный знак предприятия-изготовителя;
- 2) род (двигатель, генератор) машины;
- 3) тип машины;
- 4) род тока;
- 5) номинальные режимы работы;
- 6) наибольшую эксплуатационную частоту вращения  $n$ ;
- 7) номинальную степень возбуждения;
- 8) массу машины;
- 9) год выпуска машины;
- 10) обозначение стандарта, которому машина соответствует;
- 11) класс изоляции.

Естественно, как всякая машина, тяговый двигатель обладает определенными характеристиками.

### 4.2 Магнитные и нагрузочные характеристики тягового электродвигателя

Магнитной характеристикой машины называют зависимость магнитного потока  $\Phi$  от магнитодвижущей силы (мдс)  $F$  катушки главного полюса или тока возбуждения  $I_B$ . Часто вместо  $\Phi = f(I_B)$  используют зависимости

$$C_n \Phi = f(I_B)$$

или

$$C_v \Phi = f(I_B),$$

где  $C_n = \frac{P}{a} \cdot \frac{N}{60}$ ;  $C_v = \frac{1000\mu}{60\pi D_b} \cdot C_n$ ;  $C_n$  – конструкционная постоянная ма-

шины;  $P$  – число пар полюсов;  $a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  $N$  – число проводников обмотки якоря;  $\mu$  – передаточное отношение тяговой передачи;  $D_b$  – диаметр бандажа.

Нагрузочная характеристика – это зависимость  $\Phi = f(F)$  или  $\Phi = f(I_B)$  при различных  $I_B$ , но постоянных  $I_A$ . Эти кривые учитывают размагничивающее действие  $I_A$ . Магнитные характеристики получают при расчете магнитной цепи машины.

Для 4-полюсного тягового двигателя без компенсационной обмотки магнитная цепь имеет вид, показанный на рисунке 4.1.

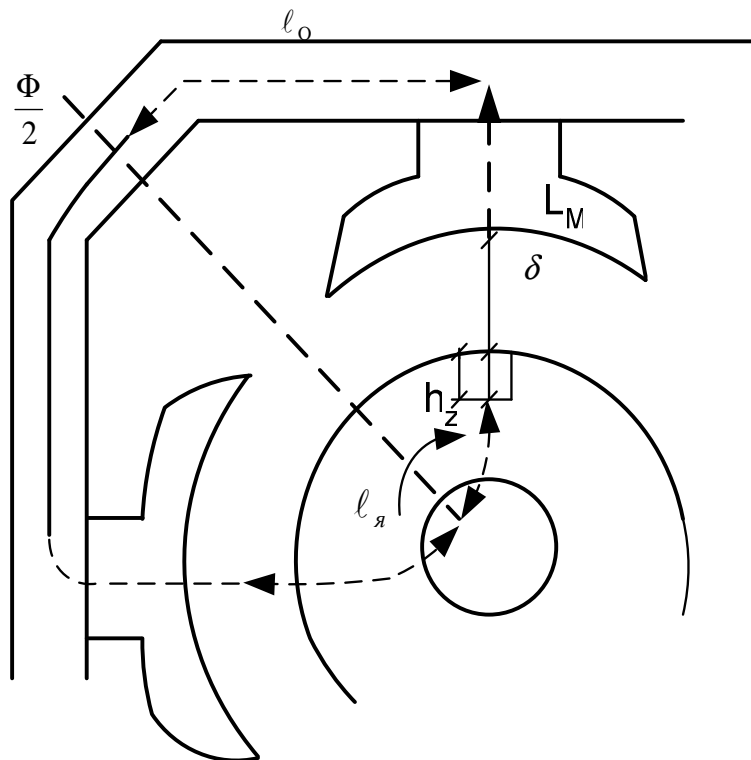


Рисунок 4.1 – Эскиз магнитной цепи тягового двигателя

Магнитная характеристика при холостом ходе машины определяется, задаваясь несколькими значениями магнитного потока, который может быть определен так:

$$\Phi = \frac{0,96U_k 60a}{pNn_H},$$

где  $U_k$  – напряжение на коллекторе;  $n_n$  – частота вращения в номинальном режиме. Обычно задается или определяется исходя из эксплуатационной необходимости.

Намагничивающую силу катушки главного полюса находят суммированием всех магнитных напряжений по участкам магнитной цепи.

Индукция на участках:

$$B_i = \frac{\Phi_i}{S_i},$$

где  $S_i$  – сечение отдельных участков магнитной цепи.

Следует учитывать, что магнитный поток сердечника полюса и остова определяется, как

$$\Phi' = \sigma\Phi,$$

где  $\sigma$  – коэффициент рассеяния магнитного потока главных полюсов.

Сечения участков магнитной цепи можно определить следующим образом:

- воздушного зазора

$$S_B = \alpha\tau\ell_{\text{я}},$$

где  $\alpha$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $\ell_{\text{я}}$  – длина якоря;  $\tau$  – полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D_{\text{я}}}{2p};$$

- остова

$$\begin{aligned} S_0 &= h_0(\tau + \ell_{\text{я}}), & \text{при } \tau > \ell_{\text{я}}; \\ S_0 &= 2h_0\ell_{\text{я}}, & \text{при } \tau \leq \ell_{\text{я}}; \end{aligned}$$

где  $h_0$  – толщина остова;

- зубцов якоря

$$S_Z = \alpha K_{\text{ия}} \ell_{\text{я}} Z_{1/3} Z / (2p),$$

где  $K_{\text{ия}}$  – коэффициент заполнения пакета якоря сталью;  $Z_{1/3}$  – ширина зубцов на 1/3 их высоты;  $z$  – число зубцов.

- сердечника якоря

$$S_{\text{я}} = 0,5(D_{\text{я}} - 2h_z - D_i - 2 \cdot 0,65n_{\text{вр}}d_{\text{в}})\ell_{\text{я}}K_{\text{ия}},$$

где  $D_{\text{я}}$  – диаметр якоря;  $h_z$  – высота зубцов;  $D_i$  – внутренний диаметр пакета якоря;  $n_{\text{вр}}$  – количество рядов вентиляционных каналов;  $d_{\text{в}}$  – диаметр канала;

- сердечника полюса

$$S_{\mu} = B_m \ell_{\text{я}} K_{\text{ип}},$$

где  $B_m$  – ширина сердечника полюса;  $K_{ип}$  – коэффициент заполнения сердечника полюса сталью.

Если у машины есть компенсационная обмотка, то площадь сечения зубцов

$$S_{zko} = B_{zko} Z_{ko} \ell_{я} K_{ип},$$

где  $B_{zko}$  – ширина зубца компенсационной обмотки;  $Z_{ko}$  – число зубцов на полюсе.

Падение напряжения в воздушном зазоре

$$F_B = 8B_B \delta K_B,$$

где  $\delta$  – эквивалентный воздушный зазор;  $B_B$  – индукция в воздушном зазоре;  $K_B$  – коэффициент воздушного зазора (учитывает зубчатую структуру якоря)

$$K_B = \frac{(t_1 + 10\delta)}{(Z_1 + 10\delta)},$$

где  $t_1$  – зубцовое деление якоря;  $Z_1$  – ширина зубца по окружности якоря.

У машин с компенсационной обмоткой

$$K'_B = K_B \frac{(t_{ko} + 10\delta)}{(B_{zko} + 10\delta)}.$$

Имея значение магнитной индукции для соответствующей стали, можно определить значения  $H_i$  напряженности магнитного поля.

Падение напряжения на стальных участках магнитной цепи

$$F_i = H_i L_i,$$

где  $H_i$  – напряженность магнитного поля на  $i$ -м участке магнитной цепи;  $L_i$  – длина силовых линий на этом участке магнитной цепи.

Из-за дополнительного воздушного зазора между полюсом и остовом возникает дополнительное падение магнитного напряжения

$$F_{mo} = 0,8B_m,$$

где  $B_m$  – индукция в сердечнике полюса.

Отсюда

$$F_o = H_o L_o + H_m L_m + H_{zko} h_{zko} + H_z h_z + H_{я} L_{я} + F_B + F_{mo}$$

для расчета характеристики  $\Phi = f(F)$ .

Необходимо проделать расчеты для различных значений магнитного потока (0,5Φ; 0,25Φ и т. д.)



При расчете двигателей последовательного возбуждения

$$I = I_B \cong F_O / \omega_B,$$

где  $\omega_B$  – число витков обмотки возбуждения.

По току якоря можно определить реакцию якоря и затем зависимость  $\Phi = f(F)$  при нагрузке

$$F = F_O + K_{ря} \cdot F_{ря},$$

где  $K_{ря}$  – коэффициент размагничивания якоря (получают опытным путем).

Кривая намагничивания показана на рис. 4.2.

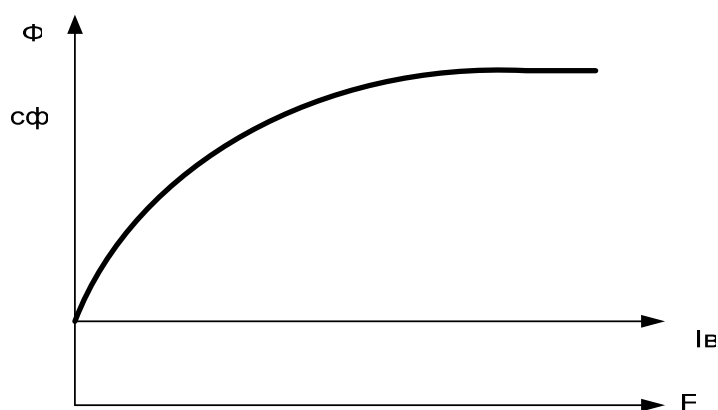


Рисунок 4.2 – Кривая намагничивания

Характеристика намагничивания является как бы базовой, служащей основанием для расчета всех остальных (эксплуатационных) рабочих характеристик двигателей.

#### 4.3. Рабочие характеристики двигателей

Рабочие характеристики двигателей делятся:

- на электромеханические;
- электротяговые;
- тяговые;
- характеристики мощности.

**Электромеханические характеристики** – зависимость частоты вращения  $n$ , вращающего момента  $M$  и коэффициента полезного действия  $\eta$  от тока  $I$ .

**Электротяговые характеристики** – это зависимости скорости движения локомотива  $V$ , касательной силы тяги  $F$  и КПД  $\eta_0$  на ободу движущих колес от тока  $I$ .

**Тяговой характеристикой** называют зависимость силы тяги двигателя (или локомотива) от скорости движения локомотива.

**Характеристикой мощности** называют зависимости мощности от скорости движения локомотива.

### 4.3.1 Электромеханические характеристики

Частота вращения двигателя определяется по формуле

$$n = \frac{U_k - I r_d}{C_n \Phi},$$

где  $r_d$  – сопротивление цепи тока тягового двигателя.

Электромагнитный вращающий момент может быть получен из уравнения электромагнитной мощности

$$P_{\text{э}} = EI = \underbrace{C_n \Phi n}_E \cdot I \quad \text{или} \quad P_{\text{э}} = M_{\text{э}} n / 0,974;$$
$$M_{\text{э}} = 0,974 C_n \Phi I.$$

Часть момента тратится на преодоление внутренних сил сопротивления

$$\Delta M = 0,974 (\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{в}}) / n,$$

где  $\Delta P_{\text{мех}}$  – механические потери;  $\Delta P_{\text{маг}}$  – потери на перемагничивание в стали;  $\Delta P_{\text{в}}$  – потери на вентиляцию.

Вращающий момент на валу двигателя

$$M = M_{\text{э}} - \Delta M = 0,974 [C_n \Phi I - (\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{в}}) / n].$$

### 4.3.2 Электротяговые характеристики

Скоростная характеристика получается из зависимости  $n = f(I)$  путем несложных пересчетов

$$V = \frac{U_k - I r_d}{C_v \Phi},$$

где  $C_v = \frac{\mu C_n}{0,188 D_6}.$

Касательная сила тяги на ободу колеса

$$F_k = 2 \mu \eta_3 M / D_6,$$

где  $\eta_3$  – КПД зубчатой передачи;  $D_6$  – диаметр бандажа колеса.

#### 4.4 Коэффициент полезного действия и потери в двигателе

Потери в тяговых двигателях (как и вообще в электрических машинах) складываются из электрических  $\Delta P_{\text{э}}$ , магнитных  $\Delta P_{\text{маг}}$ , добавочных  $\Delta P_{\text{д}}$  и механических  $\Delta P_{\text{мех}}$  потерь

$$\Delta P_{\text{дв}} = \sum \Delta P = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}.$$

Естественно, что для расчета этих потерь необходимо определить все составляющие приведенной формулы.

##### *Электрические потери*

$$\Delta P_{\text{э}} = I^2 r_{\text{д}} + I \Delta U_{\text{щ}},$$

где  $r_{\text{д}}$  – сопротивление всех обмоток двигателя;  $\Delta U_{\text{щ}}$  – падение напряжения в щётчных контактах (обычно 2...3 В).

**Магнитные потери** возникают при перемагничивании сердечника якоря. Их определяют по удельным потерям в зубцах и теле якоря:

$$\Delta P_{\text{маг}} = K_{\text{с}} (p_{\text{з}} m_{\text{з}} + p_{\text{я}} m_{\text{я}}),$$

где  $K_{\text{с}}$  – коэффициент магнитных потерь в стали якоря.

Это эмпирический коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали из-за неидеальности шихтовки, наклепа при штамповке и добавочных потерь холостого хода

$$K_{\text{с}} \approx 0,8 \sqrt{p_{1,5/50}},$$

где  $p_{1,5/50}$  – удельные потери в электротехнической стали при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц (Вт/кг);  $m_{\text{я}}$  – масса стали ярма якоря;  $m_{\text{з}}$  – масса стали зубцового слоя якоря;  $p_{\text{я}}$  – удельные магнитные потери в ярме якоря;  $p_{\text{з}}$  – удельные магнитные потери в зубцовом слое якоря.

Масса ярма (или тела) якоря определяется по формуле

$$m_{\text{я}} = \frac{\pi}{4} [(D_{\text{я}} - 2h_{\text{п}})^2 - D_{\text{и}}^2 - m_{\text{к}} d_{\text{к}}^2] K_{\text{ия}} \cdot \ell_{\text{я}} \gamma_{\text{с}},$$

где  $h_{\text{п}}$  – высота паза якоря;  $D_{\text{и}}$  – диаметр отверстия под втулку, на которую набирается сердечник якоря, м;  $m_{\text{к}}$  – количество вентиляционных каналов;  $d_{\text{к}}$  – диаметр вентиляционных каналов, м;  $K_{\text{ия}}$  – коэффициент заполнения пакета якоря сталью;  $\ell_{\text{я}}$  – длина якоря;  $\gamma_{\text{с}} = 7850 \text{ кг/м}^3$  – плотность.

Аналогично определяется масса зубцового слоя

$$m_{\text{з}} = [\pi(D_{\text{я}} - h_{\text{п}}) - Z \cdot b_{\text{п}}] \cdot h_{\text{п}} \ell_{\text{я}} K_{\text{ия}} \gamma_{\text{с}},$$

где  $Z$  – число зубцов якоря;  $b_{\text{п}}$  – ширина паза якоря, м.

Удельные потери в ярме якоря могут быть определены по формуле

$$p_{\text{я}} = \left[ 0,044f_{\text{я}} + 5,6 \cdot (0,01f_{\text{я}})^2 \right] \cdot B_z^2$$

и в зубцах

$$p_z = \left[ 0,044f_z + 5,6(0,01f_z)^2 \right] \cdot B_z^2,$$

где  $f_{\text{я}}$  – частота перемагничивания якоря,

$$f_{\text{я}} = \frac{p \cdot n}{60};$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $n$  – частота вращения.

Механические потери в двигателе зависят от следующих факторов:

- потерь на трение в якорных подшипниках;
- потерь на трение щеток о коллектор;
- потерь на трение о воздух и вентиляцию при самовентиляции.

Потери на трение в якорных подшипниках качения составляют примерно 0,2 % от часовой мощности тягового двигателя

$$\Delta P_{\text{пч}} = 0,002P_{\text{ч}}, \text{ КВт.}$$

Вторые из перечисленных потери зависят от силы трения щеток о коллектор, а так же от скорости вращения и могут быть определены

$$F_{\text{тщ}} = f_{\text{тщ}} p_{\text{тщ}} \sum S_{\text{тщ}},$$

где  $f_{\text{тщ}} = 0,25 \dots 0,29$  – коэффициент трения щеток о коллектор;  $\sum S_{\text{тщ}}$  – общая площадь щеток;  $p_{\text{тщ}}$  – давление щеток на коллектор.

Тогда потери могут быть определены, как

$$P_{\text{тщ}} = 9,81 F_{\text{тщ}} \cdot V_{\text{кч}},$$

где  $V_{\text{кч}}$  – линейная скорость коллектора.

Это потери при часовом режиме.

В случае изменения режима, а так же при построении характеристик кпд, потери в подшипниках и от трения щеток о коллектор будут определяться, по формуле

$$\Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\text{тщ}} = (\Delta P_{\text{пч}} + \Delta P_{\text{тщч}}) \cdot \frac{n}{n_{\text{ч}}},$$

где  $n$ ,  $n_{\text{ч}}$  – частоты вращения в заданном и часовом режимах.

В случае самовентиляции возникают дополнительные потери, вызванные сопротивлением воздуха

$$\Delta P_{\text{вн}} = 9,81 QH / \eta_{\text{в}},$$

где  $Q$  – расход воздуха  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напор  $\text{кг} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ;  $\eta_{\text{в}}$  – кпд вентилятора.

К добавочным потерям  $\Delta P_d$  обычно относят потери, связанные с вихревыми токами в меди обмотки якоря. Вызваны они, как правило, искажением магнитного поля реакции якоря.

Есть несколько способов определения добавочных потерь. Самый простой из них, это определение потерь в процентном отношении от магнитных потерь по диаграмме (рис. 4.3).

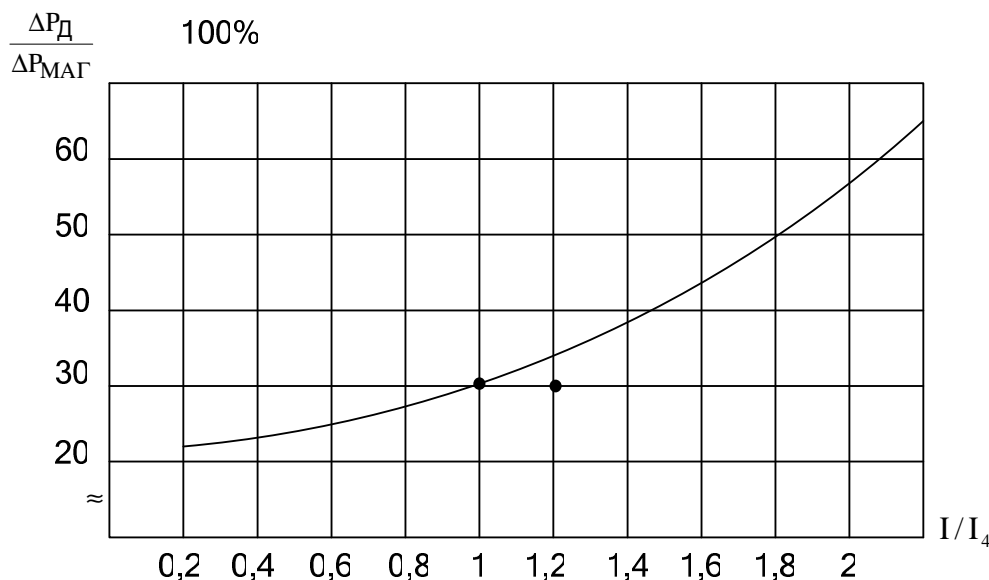


Рисунок 4.3 – Зависимость отношения добавочных потерь от магнитных

Таким образом, имея потери в двигателе, можно определить, КПД отнесенный к валу двигателя как

$$\eta = \frac{U_k I - \Delta P_{\text{дв}}}{U_k I} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{дв}}}{U_k I}.$$

Если машина в генераторном режиме,

$$\eta = \frac{U_k I}{U_k I + \Delta P_{\text{дв}}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{\text{дв}}}{U_k I}},$$

КПД отнесенный к ободам движущей колесной пары

$$\eta_o = \eta \cdot \eta_3,$$

где  $\eta_3$  – кпд зубчатой передачи. Обычно  $\eta_3$  определяется по диаграмме в функции от мощности.

Таким образом, определяются зависимости, описывающие электромеханические и электротяговые характеристики. Вид этих характеристик приведен на рисунке 4.4.

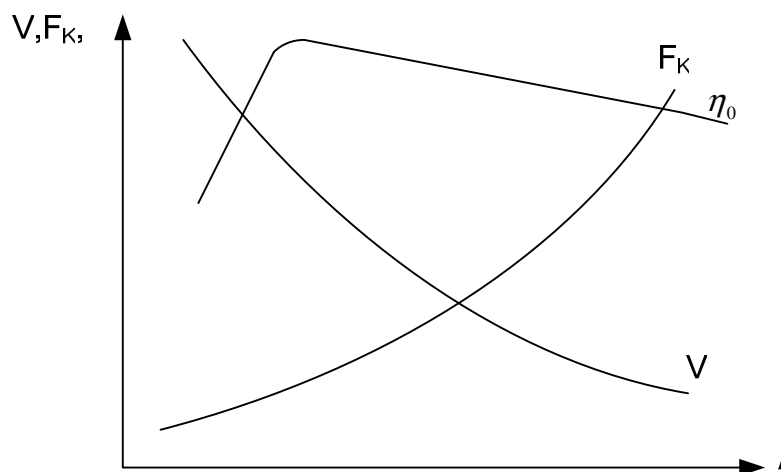


Рисунок 4.4 – Общий вид электромеханических и электротяговых характеристик электродвигателя

Осталось определить тяговую характеристику, т. е. зависимость  $F_k = f(V)$ .

При заданной скорости движения силу тяги можно определить, используя уравнения мощности, реализуемой на ободу колеса

$$P_k = F_k V / 0,367 ,$$

так как  $P_k = U_k I_{\eta_0}$  то,

$$F_k = 0,367 U_k I_{\eta_0} / V .$$

## 5 ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В условиях эксплуатации необходимо непрерывно менять режимы работы двигателя, поддерживая ток и силу тяги в допустимых или в необходимых пределах. Это же можно сказать и о скорости.

Для того чтобы было наглядно видно, какие из параметров тягового двигателя можно регулировать, запишем ещё раз формулу для расчета скорости

$$V = \frac{U_k - I r_d}{C_v \Phi} .$$

Из этого уравнения видно, что регулировать скорость можно изменением напряжения на коллекторе, изменением тока и магнитного потока.

Допустим, что формула записана для одного значения скорости  $V_1$  и напряжения  $U_{k1}$  тогда если напряжение стало  $U_{k2}$ , то характеристику скоростную можно пересчитать по формуле

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{(U_{k2} - I r_d)}{(U_{k1} - I r_d)} .$$

На электровозах переменного тока применяют либо ступенчатое регулирование напряжения за счет секционирования обмотки трансформатора (ВЛ80к), либо плавное регулирование – с использованием тиристорных регуляторов (ВЛ80р, ВЛ85).

На электровозах постоянного тока обычно используют два способа регулирования напряжения: это переключение числа последовательно включенных двигателей, т. е. изменение так называемой группировки двигателей (С, СП, П), либо включение в цепь двигателей пусковых реостатов и за счет падения напряжения на них, снижение напряжения на тяговых двигателях.

При этом напряжение на двигателе можно определить как

$$V_k = \frac{U_c - mIR_{\Pi}}{n_c},$$

где  $U_c$  – напряжение контактной сети;  $n_c$  – число последовательно включенных двигателей в сети;  $m$  – число параллельных двигателей;  $R_{\Pi}$  – сопротивление пускового реостата.

Тогда скорость при включении сопротивления будет определяться, как

$$V_R = V \cdot \frac{U_c - I(mR_{\Pi} + n_c r_d)}{(U_k - I r_d) \cdot n_c}.$$

Как уже отмечалось, можно регулировать скорость и с помощью изменения магнитного потока, достигается это несколькими способами:

- 1) секционированием катушек главных полюсов;
- 2) изменением тока возбуждения (при независимом возбуждении);
- 3) шунтированием обмотки возбуждения резистором.

Первый способ очень дорог и не удобен, так как для его реализации требуется усложнение конструкции машины. Второй способ не может быть реализован у двигателей последовательного возбуждения.

Третий способ самый распространенный. Обмотка возбуждения шунтируется резистором и индуктивным шунтом, включенным с ним последовательно. Шунт ставят для защиты двигателей от резких бросков напряжения. Его наличие позволяет относительно плавно изменяться току в двигателе при бросках напряжения.

Степень регулирования оценивается коэффициентом возбуждения  $\beta$ :

$$\beta = \frac{I_{\text{пв}}}{I_{\text{ов}}},$$

где  $I_{\text{ов}}$ ,  $I_{\text{пв}}$  – ток в обмотке при ослабленном и полном возбуждении.

Для получения скоростных характеристик при ослабленном возбуждении обычно используют метод, основанный на примерном равенстве магнитных потоков при одинаковой скорости движения в случае полного и ослабленного возбуждения (рис. 5.1).

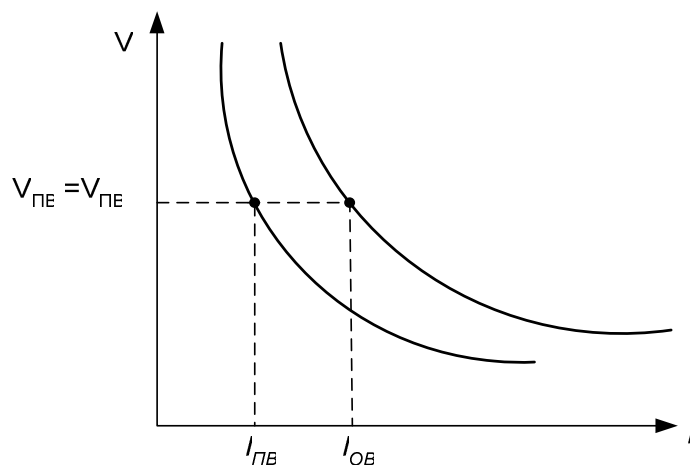


Рисунок 5.1 – Скоростные характеристики при ослаблении поля

Получение зависимости силы тяги от тока при ослабленном возбуждении (рис. 5.2) основано на том, что при токах  $I_{ПВ}$  и  $I_{ОВ}$  магнитные потоки приблизительно равны  $\Phi_{ОВ} \approx \Phi_{ПВ}$

$$F_{КОВ} \cong F_{КПВ} / \beta.$$

Степень ослабления поля зависит от допустимого межламельного напряжения. У машин с компенсационной обмоткой  $\beta_{\max} = 0,2 \dots 0,4$ .

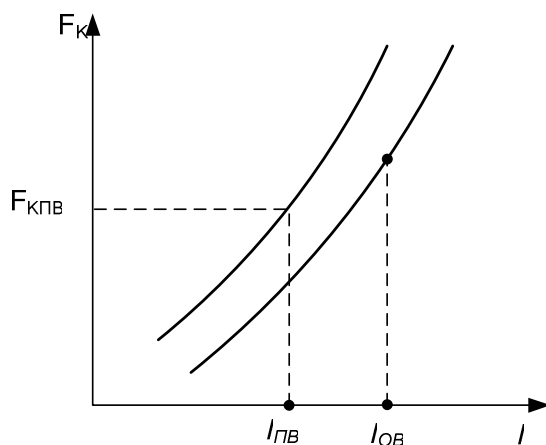


Рисунок 5.2 – Электротяговые характеристики при ослаблении поля

Регулировочные свойства машины принято оценивать коэффициентом регулируемости

$$K_p = (K_H \cdot \beta_{\max})^{-1},$$

где  $K_H = 1,6 \dots 2$  – коэффициент насыщения.



## 6 КОММУТАЦИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 6.1 Критерии оценки качества коммутации

Коммутация в машинах постоянного тока представляет собой ряд явлений, вызванных процессом изменения тока в секциях обмотки якоря за время их перехода из одной параллельной ветви обмотки в другую. Секции обмотки в течение этого времени замыкаются накоротко щетками. Это время – период коммутации.

**Коммутация** – это процесс изменения тока в секции обмотки якоря.

Коммутация признается хорошей, если под щетками при работе машины с нагрузкой или на холостом ходу не возникает искрения. И наоборот, если наблюдается искрообразование, вызывающее повреждения поверхности коллектора, то это – неудовлетворительная коммутация.

Практикой установлены два основных критерия для оценки качества коммутации:

- 1) степень искрения щеток, оцениваемая по стандартной шкале;
- 2) ширина безыскровой зоны.

Стандартная шкала искрения формирует следующие степени:

- 1 – отсутствие искрения, или темная коммутация;
- $1\frac{1}{4}$  – слабое искрение под небольшой частью щетки;
- $1\frac{1}{2}$  – слабое искрение под большей частью щетки;
- 2 – искрение под всем краем щетки;
- 3 – значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных вылетающих искр.

Надежная работа машин в длительном режиме обеспечивается при условии, что искрение на щетках не превосходит степени  $1\frac{1}{4}$ .

Визуальная оценка коммутации вносит субъективизм в результаты. Для объективной оценки разработан ряд приборов, основанный на фотоэлектрических датчиках. Чем же вызвано искрение под щетками? Существует два вида основных причин, вызывающих искрение:

- механические;
- электромагнитные, т. е. собственно коммутационные.

К механическим причинам искрения относятся следующие:

- 1) биение коллектора, под которым подразумевается:
  - а) нарушение цилиндрической поверхности коллектора, вызванное плохим качеством шлифовки;
  - б) выступание миканита;
- 2) неправильная притирка щеток;
- 3) неправильная расстановка щеток;
- 4) неправильная величина нажатия щеток;
- 5) ослабление щеток в гнездах. Боковой износ щеток, их перекосы, выкрашивание;

- 6) неодинаковый воздушный зазор под различными полюсами;
- 7) косая сборка коллекторных пластин;
- 8) неодинаковая толщина коллекторных пластин или миканита;
- 9) загрязнение поверхности коллектора.

Большое влияние на работу тяговых машин оказывает конфигурация и материал щеток.

В тяговых машинах два основных сорта щеток: твердые угольно-графитные щетки и электрографитированные.

Электромагнитные причины искрения будут описаны позднее, при рассмотрении процессов коммутации.

Наиболее просто процесс коммутации объясняется в так называемой классической теории.

## 6.2 Коммутация при установившихся процессах

Согласно классической теории коммутации, ток в коммутируемой секции будет изменяться во времени прямолинейно, если щетка перекрывает одно коллекторное деление, сопротивление щеточного контакта сохраняется постоянным, и коллектор вращается медленно. При быстром вращении коллектора в коммутируемой секции появляется ЭДС самоиндукции от изменяющегося тока.

Для того чтобы коммутация сохранялась прямолинейной, рекомендуется наводить в коммутируемых витках ЭДС, равную ЭДС самоиндукции. Для наведения коммутирующей ЭДС, равной ЭДС самоиндукции, и служат добавочные полюса. Таким образом, все расчеты коммутации сводятся к расчету ЭДС самоиндукции и расчету МДС обмотки добавочных полюсов. Кроме ЭДС самоиндукции в коммутирующей секции наводится и ЭДС взаимной индукции из-за расположения в пазу пазовых частей 2-х секций.

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что суммы ЭДС самоиндукции и взаимной индукции – это мгновенные значения реактивной ЭДС коммутирующей секции

$$e_p = L_{\text{э}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} = L_{\text{э}} \frac{2i_{\text{я}}}{T_{\text{к}}},$$

где  $L_{\text{э}}$  – эквивалентная индуктивность секции;  $i_{\text{я}}$  – ток в параллельной ветви обмотки якоря;  $T_{\text{к}}$  – период коммутации (время в течение которого осуществляется коммутация).

Эквивалентная индуктивность

$$L_{\text{э}} = L + M,$$

где  $L$  и  $M$  – коэффициенты само- и взаимной индукции.

Период коммутации

$$T_{\text{к}} = \frac{b_{\text{щ}}}{100V_{\text{к}}},$$

где  $b_{\text{щ}}$  – ширина щетки;  $V_{\text{к}}$  – окружная скорость коллектора, обычно  $T_{\text{к}} = 10^{-4} \dots 10^{-5}$  с.

Максимальное значение реактивной ЭДС может быть определено исходя из изменения магнитного потока рассеяния пазов  $\Phi_{рп}$ , в которых расположены коммутирующие секции. Если поток изменяется от  $-\Phi_{рп}$  до  $+\Phi_{рп}$ , то

$$e_p = \omega_c \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где  $\omega_c$  – число витков секции. В тяговых двигателях  $\omega_c = 1$ .

Магнитный поток

$$\Phi_{рп} = 2I_k i_a \omega_c \ell_{я} \lambda_{п},$$

где  $I_k$  – число коллекторных пластин, приходящихся на один паз;  $\lambda_{п}$  – удельная проводимость магнитного потока.

Число коллекторных пластин на паз определяется по формуле

$$I_k = \frac{K}{Z},$$

где  $K$  – число коллекторных пластин;  $Z$  – число зубцов (пазов) якоря.

Ширина зоны коммутации  $B_{зк}$ , отнесенная к окружности коллектора может быть определена как:

$$B_{зк} = t_k (I_k - 1 + \gamma + \epsilon_k),$$

где  $\gamma = B_{щ} / t_k$  – коэффициент щеточного перекрытия;  $t_k$  – коллекторное деление;  $\epsilon_k$  – укорочение шага обмотки в коллекторных делениях, которое может быть вычислено по формуле:

$$\epsilon_k = \left( \frac{Z}{2p} - Y_z \right) I_k,$$

где  $Y_z$  – шаг обмотки по пазам.

Период времени, в течение которого происходит полное изменение потока

$$T_{кп} = \frac{B_{зк}}{V_k}.$$

Так как магнитное поле обоих пазов, в которых расположены стороны коммутируемой секции изменяется одновременно, то

$$\frac{d\Phi}{dt} \cong \frac{4\Phi_{рп}}{T_{кп}}.$$

Подставляя в формулу значения  $\Phi_{рп}$  и  $T_{кп}$ , получим формулу, определения реактивной ЭДС коммутируемой секции, получившую наименование – формула А. Б. Иоффе

$$e_p = \frac{8i_{\text{я}} \cdot \omega_{\text{с}}^2 \cdot V_{\text{к}} \cdot I_{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot \ell_{\text{я}}}{t_{\text{к}}(I_{\text{к}} - 1 + \gamma + \varepsilon_{\text{к}})}.$$

Из формулы видно, что реактивная ЭДС зависит прямо пропорционально от удельной проводимости магнитного потока пазового рассеяния  $\lambda_{\text{п}}$

$$\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{пп}} + \lambda_{\text{пв}} + \lambda_{\text{з}} + \lambda_{\text{л}},$$

где  $\lambda_{\text{пп}}$  – проводимость в зоне расположения проводников;  $\lambda_{\text{пв}}$  – проводимость в зоне клинового крепления секции;  $\lambda_{\text{з}}$  – проводимость в зоне воздушного зазора;  $\lambda_{\text{л}}$  – проводимость в зоне лобовых частей обмотки, отнесенная к пазу.

По формуле А.Б. Иоффе определено максимальное значение реактивной ЭДС однако необходимо знать и изменение этой ЭДС в пределах зоны коммутации. Такое знание открывают диаграммы пазового поля. Рассмотрим их для случая диаметральной обмотки (когда отсутствует пазовое укорочение) и для хордовой обмотки якоря (рис. 6.1).

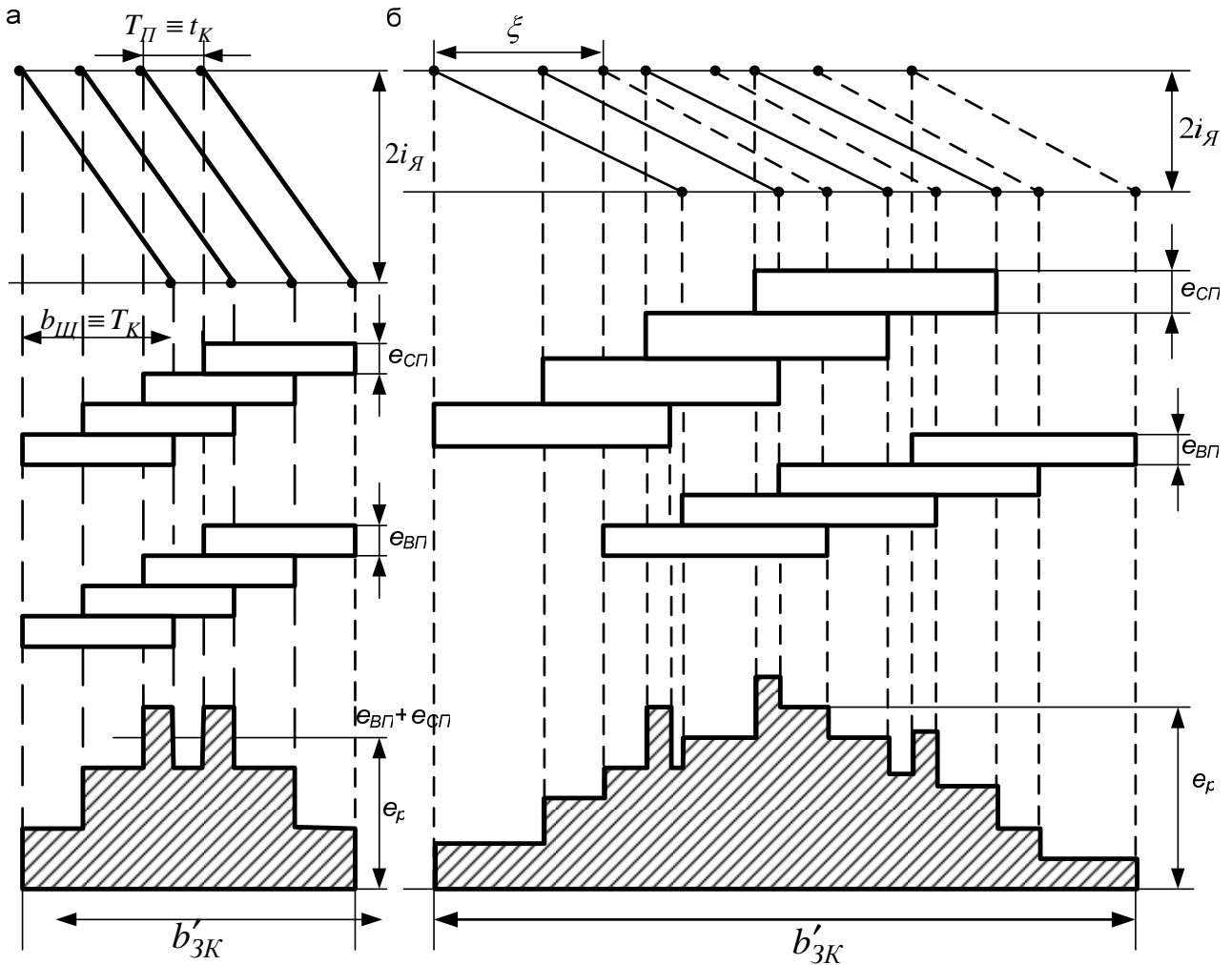


Рисунок 6.1 – Диаграммы пазового поля: а – для диаметральной обмотки; б – для хордовой обмотки

При построении диаграмм будем учитывать, что ЭДС самоиндукции  $e_{сп}$  в пазу и взаимоиндукции  $e_{вп}$  в каждом проводнике постоянны и ширина зоны коммутации, отнесенная к коллектору

$$B'_{зк} = B_{зк} \frac{D_k}{D_j}.$$

Обычно в тяговых двигателях значение реактивной ЭДС поднимается до 18...20 В, но это предельные значения. Как правило,  $e_p \leq 6...7$  В, а если тяжелые условия токосъема,  $e_p \leq 3...5$  В.

### 6.3 Электромагнитные причины искрения

По итогам рассмотрения диаграмм можно сформулировать электромагнитные причины искрения.

1. Невозможность создания компенсирующего поля, в точности совпадающего по форме для любого момента времени с теоретически требующимся. Вследствие этого остаются небалансные или остаточные ЭДС.

2. Искажение кривой распределения поля добавочных полюсов под влиянием поля главных полюсов.

3. Различная степень демпфирующего влияния вихревых токов в проводниках обмотки якоря на пазовое поле рассеяния коммутирующих секций при широком диапазоне изменения частоты.

4. Пульсации потока главных полюсов машины вследствие изменения магнитной проводимости зазора, что вызывает появление трансформаторной ЭДС в коммутируемых секциях.

5. Несоответствие во времени между налагающейся переменной, составляющей в реактивной ЭДС коммутации, вызванной пульсацией тока якоря, и коммутирующей ЭДС, создаваемой добавочными полюсами (только для двигателей пульсирующего тока).

### 6.4 Круговой огонь на коллекторе тяговых двигателей

Круговым огнем на коллекторе называется быстро переходящая электрическая дуга между разнополярными щетками. Круговой огонь – это наиболее неблагоприятный процесс, который может возникнуть только при токосъеме в тяговых двигателях. Даже продолжительное искрение под щетками в пределах установленных норм не вызывает обычно повреждений коллектора. Круговой огонь представляет большую опасность, так как при этом дугой перекрывается вся поверхность машины (коллектора) между щетками противоположной полярности или переброс её на заземленные части (подшипниковые щиты, полюсы и т. д.) (рис. 6.2).

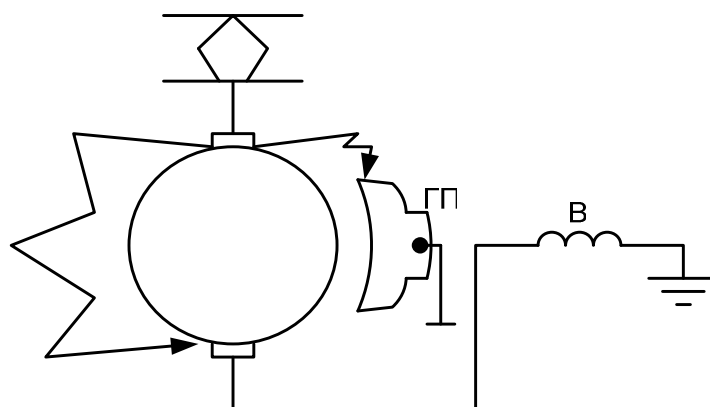


Рисунок 6.2 – Пример образования кругового огня

Склонность машины к образованию круговых огней существенно снижает её эксплуатационную надежность. Кроме того, при возникновении кругового огня получается сильный бросок тока, а следовательно и силы тяги. Максимум броска тока достигает 10...16-кратного значения действующего до этого тока.

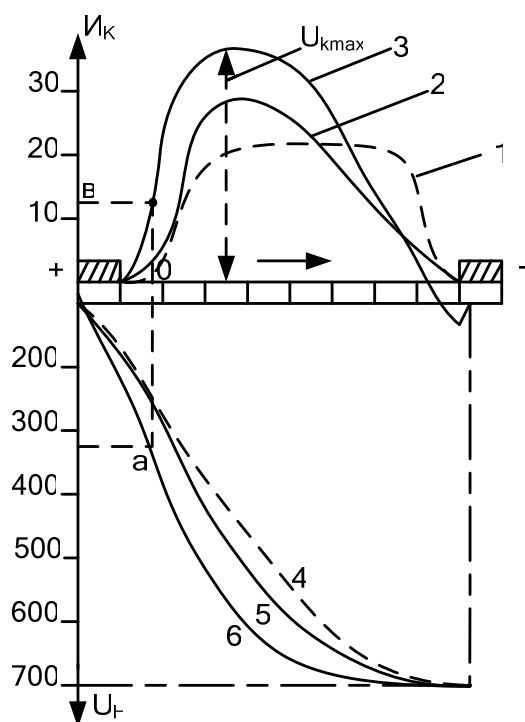


Рисунок 6.3 – Распределение потенциала между соседними коллекторными пластинами и между щетками: 1 – график распределения потенциала между соседними коллекторными пластинами без учета реакции якоря; 2 – с учетом реакции якоря при токе, равном  $0,5 I_n$ ; 3 – при токе  $1,5 I_n$ ; 4, 5, 6 – кривые распределения потенциала на коллекторе

Основными двумя причинами образования кругового огня можно назвать:

- 1) сильное искрение под щетками в виде длинных язычков пламени;
- 2) попадание между продороженными коллекторными пластинами токопроводящих частиц (щеточная и медная пыль, осколки щеток).

В обоих случаях для появления кругового огня необходимы, кроме указанных, потенциальные условия на коллекторе. Если их нет, то даже при сильном загрязнении и искрении под щетками круговой огонь не возникает.

Каким же образом из-за сильного искрения образуется круговой огонь?

Действительно, кривая разности потенциалов между соседними коллекторными пластинами под влиянием реакции якоря сдвигается в режиме двигателя своим крутым фронтом в сторону сбегающего края щетки (рис. 6.3).

Как же образуется дуга? Проиллюстрировать процесс образования дуги можно рисунке 6.4.

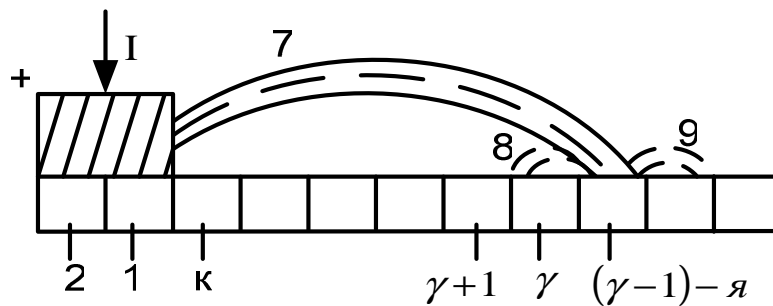


Рисунок 6.4 – Процесс образования дуги

Вследствие сильного искрения под положительной щеткой (из-за высокого напряжения  $U_{\text{кmax}}$ ) на уходящей коллекторной пластине образуется катодное пятно. Катодное пятно это обязательный атрибут кругового огня (его зарождение). Такое пятно обеспечивает термическую ионизацию окружающего пространства. Если пластина с катодным пятном переместилась в точку  $\gamma$  и напряжения  $U_{\text{оа}}$  оказалось достаточно, чтобы поддержать дугу 7 (при этом напряжение  $U_{\text{ов}}$  или разность потенциалов между  $\gamma$  и  $\gamma+1$  оказались достаточно, чтобы поддержать дугу 8), то она будет существовать и дальше, например, как дуга 9. Перемещаясь далее, эта дуга и возникающие за ней дуги ионизируют воздух около поверхности коллектора, в результате чего и создаются условия для появления кругового огня, т. е. электрической дуги между щетками.

Вторая из названных причин – попадание токопроводящих частиц между пластинами – является более частой, чем первая.

Условиями, в этом случае, для возникновения кругового огня будут служить:

- 1) достаточно быстрое нарастание тока через образовавшийся токопроводящий мостик, чтобы быстро раскалить металл;
- 2) достаточно большое напряжение между соседними пластинами, чтобы поддержать дугу.

Обычно напряжения 25...27 В между двумя соседними пластинами оказывается достаточно, чтобы поддержать дугу. На образование круговых огней сказываются и динамические воздействия от пути на тяговый двигатель.

Для защиты машины от круговых огней принимают специальные меры. Одной из таких мер можно считать снижение среднего значения напряжения между двумя коллекторными пластинами

$$U_{\text{к.ср}} = \frac{2pU}{K},$$

которое не должно превышать определенных величин для двигателей с компенсационной обмоткой, без неё, для генераторов и т. д. В целом  $U_{\text{к.ср}}$  лежит в пределах 18...20 В. Еще более важной величиной является наибольшее напряжение между коллекторными пластинами

$$U_{к.мах} = \frac{2pU}{\alpha K} \xi,$$

где  $\xi$  – коэффициент искажения поля;  $\alpha$  – коэффициент полюсного перекрытия.

При толщине изоляции между пластинами 0,8...2,2 мм  $U_{к.мах}$  не должно превышать 30...40 В в наиболее тяжелых режимах работы.

Круговой огонь вызывает массу нежелательных явлений. Кроме бросков тока и силы тяги, могут происходить и выплавление коллекторных пластин и разбрызгивание металла по поверхности коллектора. Это приводит либо к обточке коллектора, либо к его смене. Может возникнуть необходимость в продорожке.

### 6.5 Дополнительные полюсы и компенсация ими реактивной ЭДС

Дополнительные полюсы предназначены для компенсации реактивной ЭДС. Для того чтобы произошла компенсация, необходимо создать в зоне коммутации индукцию

$$B_k = e_p / 2\omega_c \ell_{я} U_{я}.$$

Такую индукцию можно получить, если мдс положительного полюса будет равной

$$F_d = F_{ря} + F_k + F_2,$$

где  $F_{ря}$  – мдс реакции якоря в зоне коммутации;  $F_k$  и  $F_2$  падение магнитного потенциала в воздушном и дополнительном зазоре.

Установлено, что реактивная ЭДС зависит от тяговых нагрузок двигателя. В связи с этим, естественно, наиболее полная компенсация реактивной э.д.с. возможна, когда  $B_k \equiv I$  и соответствующий ей магнитный поток

$$\Phi_k = B_k \ell_{я} (B_k + 3\delta_d)$$

тоже пропорционален току

$$\Phi_k \equiv I.$$

В формулах  $B_k$  – ширина наконечника дополнительного полюса;  $\delta_d$  – воздушный зазор под дополнительным полюсом.

Для того чтобы во всех режимах выдерживать пропорцию, необходимо любыми средствами снизить магнитную насыщенность магнитной цепи. Это возможно путем увеличения зазора  $\delta_d$ , либо созданием дополнительного зазора с диамагнитной прокладкой  $\delta_{d2}$  (рис. 6.6).

Расчетные индукции в остоле составляют, как правило 1,5...1,6 Т. В сердечнике дополнительного полюса индукция ограничивается уровнем 0,8...0,9 Т.



Рассчитать индукцию в дополнительном полюсе можно по формуле

$$B_D \cong \frac{B_K \ell_{\text{я}} \sigma_D (B_K + 3\delta_D)}{B_D \ell_D},$$

где  $\ell_D$  – длина полюса (дополнительного).

Большое значение имеет коэффициент магнитного рассеяния, который характеризует степень использования создаваемого дополнительными полюсами магнитного потока

$$\sigma_D = 1 + \frac{\Phi_{\text{рД}}}{\Phi_K},$$

где  $\Phi_{\text{рД}}$  – часть магнитного потока, рассеивающегося через воздух и главный полюс.

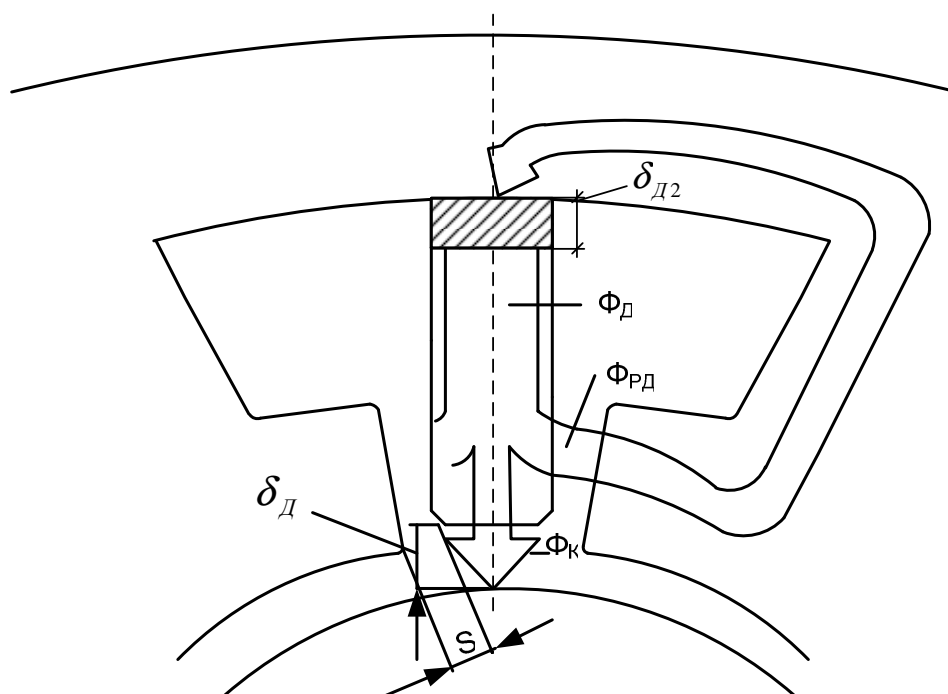


Рисунок 6.6 – Магнитные потоки дополнительного полюса

Не трудно догадаться, что чем больше коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha$  и ширина наконечника  $B_K$ , тем больше рассеивание магнитного потока дополнительного полюса. Компенсацию реактивной ЭДС можно проиллюстрировать диаграммой на рисунке 6.7.

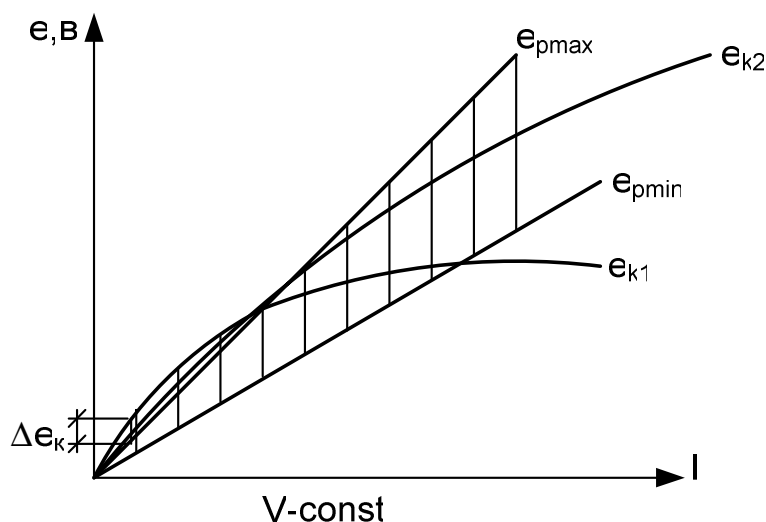


Рисунок 6.7 – Компенсация реактивной ЭДС

При постоянной скорости вращения  $e_{k1}$  компенсируется ЭДС у машин с высоким насыщением (без второго зазора),  $e_{k2}$  – для машин со вторым зазором. Величина  $\Delta e_k$  – характеризует степень перекомпенсации машины. Некоторая перекомпенсация двигателей желательна во всем диапазоне рабочих режимов.

## 6.6 Потенциальные условия на коллекторе

Исследования и опыт эксплуатации показывают, что критические напряжения  $\Delta U_{kp}$  между двумя смежными пластинами, необходимые для возникновения катодного пятна и поддержания первичной дуги, зависят от толщины изоляции между ними. Это первое условие горения дуги.

Второе условие существования дуги можно определить как

$$\sum_0^{\ell_D} \Delta U_k \geq U_D(\ell_D),$$

где  $\ell_D$  – длина дуги;  $\Delta U_k$  – напряжение между смежными коллекторными пластинами,

$$\Delta U_k \cong e_1 + e_2,$$

где  $e_1$  и  $e_2$  – ЭДС наводимое в проводниках при перемещении их в поле главных полюсов. Зависят эти величины от индукции в местах расположения проводников. Если пазовые укорочения  $\xi$  невелики, то  $B_{B1} \approx B_{B2}$  и следовательно  $e_1 = e_2$ , тогда  $\Delta U_k = 2e \equiv B_B$  (рис. 6.8).

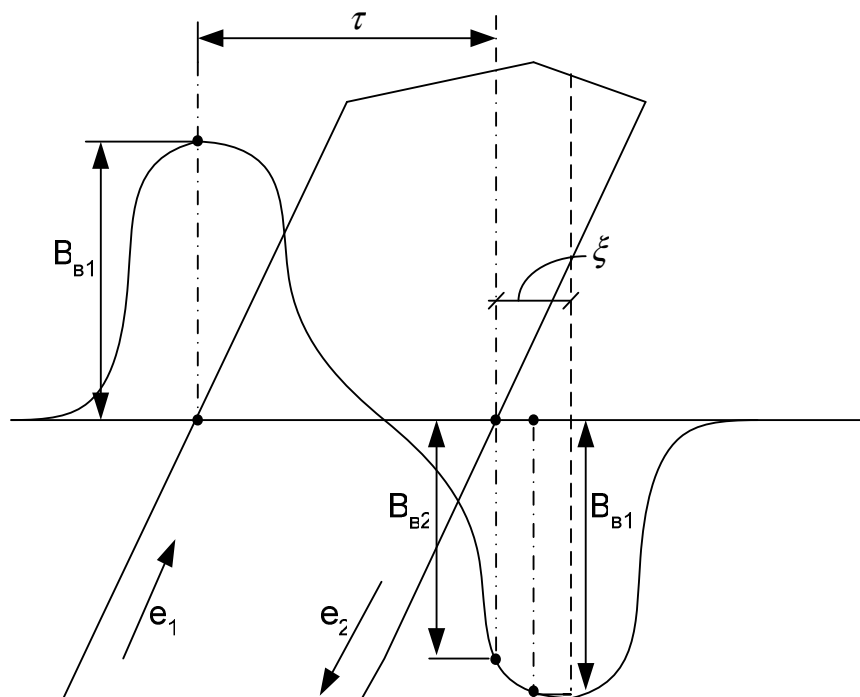


Рисунок 6.8 – Электродвижущая сила в проводниках якоря при хордовой обмотке

Если  $\Delta U_k$  пропорционально  $B_v$ , то можно сделать вывод о том, что распределение напряжения по окружности коллектора неравномерно и подобно распределению индукции в воздушном зазоре под полюсом. Это неравномерность оценивается коэффициентом искажения распределения

$$K_u = \frac{\Delta U_{kб}}{\Delta U_{кр}} \approx \frac{B_{вб}}{B_{вср}},$$

где  $\Delta U_{кб}$  и  $B_{вб}$  – максимальные значения напряжения между коллекторными пластинами и индукцией в воздушном зазоре под полюсом;  $B_{вср}$  – среднее значение индукции.

Распределение индукции в воздушном зазоре под полюсом (как мы уже отмечали) зависит от индукции холостого хода и реакции якоря

$$B_v = B_{во} + B_{ря},$$

где  $B_{во}$  – индукция холостого поля, создаваемая главными полюсами;  $B_{ря}$  – индукция реакции якоря.

Графически это показано на рисунке 6.9.

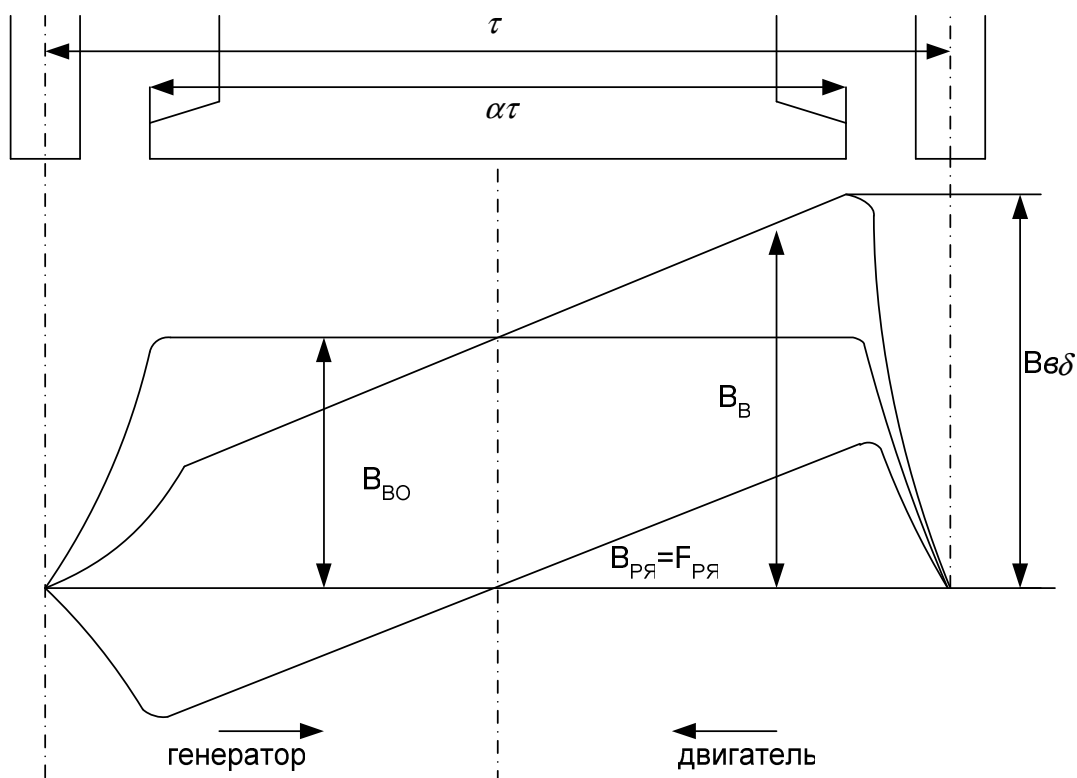


Рисунок 6.9 – Распределение индукции в воздушном зазоре

Из рисунка видно, что индукция  $B_{РЯ}$  вызывает неравномерность распределения индукции  $B_B$  и зависит от линейной нагрузки  $A$  – возрастает с её увеличением и уменьшается при её уменьшении.

Ранее была приведена формула, где показано, что напряжение  $\Delta U_K$  между смежными коллекторными пластинами пропорционально индукции  $B_B$  в связи с этим диаграмма распределения напряжения по окружности коллектора будет иметь аналогичный вид (рис. 6.10).

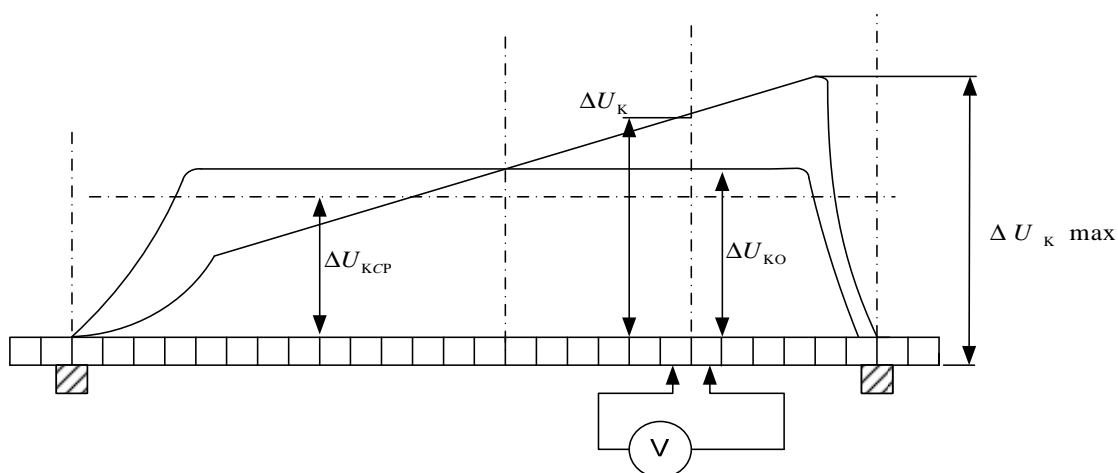


Рисунок 6.10 – Напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами

Если сделать допущение о непрерывности изменения величины  $\Delta U_K$  при перемещении секции в поле главных полюсов, то можно определить напряжение на коллекторе от одной щетки до другой, как

$$U_K = \int_0^{\tau_K} \Delta U_K dx,$$

где  $\tau_K$  – полюсное деление, отнесенное к окружности коллектора,

$$\tau_K = \tau \frac{D_K}{D_Y}.$$

По существу это расстояние между осями щеток различной полярности. Диаграмма распределения  $U_K$  выйдет следующим образом (рис. 6.11).

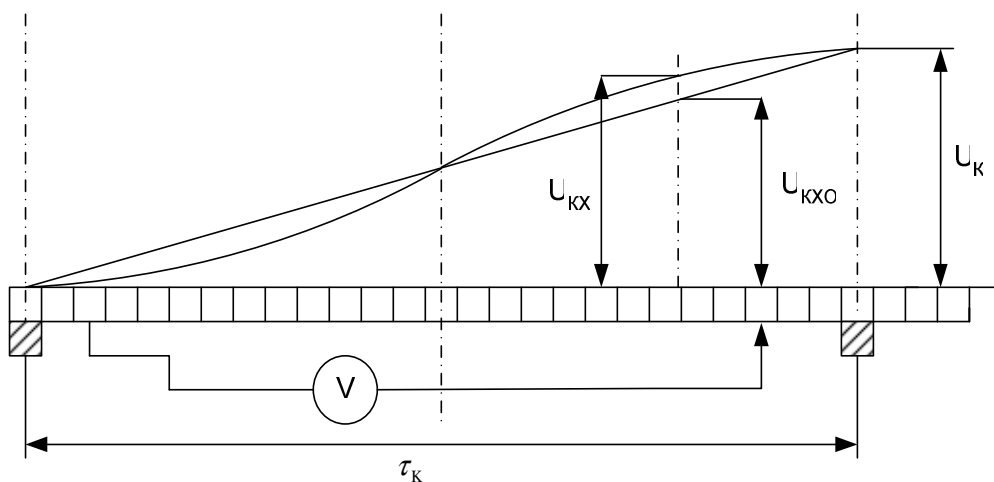


Рисунок 6.11 – Распределение напряжения на коллекторе

При ослаблении возбуждения реакция якоря усиливается, а следовательно возрастает  $\Delta U_{K6}$  и коэффициент искажения распределения  $K_u$ . При одной и той же мдс возбуждения, а следовательно, при одном и том же потоке главных полюсов ток якоря при ослабленном возбуждении  $I_{Oв}$  возрастает по сравнению с током полного возбуждения. Соответственно в  $1/\beta$  раз возрастает реакция якоря, которая приводит к росту  $\Delta U_{K6}$  и  $K_u$ .

Искажающее влияние реакции якоря определяют отношением падения магнитного напряжения в воздушном зазоре к мдс реакции якоря под краем полюса. Это отношение называют коэффициентом магнитной устойчивости

$$K_y = 2F_{BO} / A\alpha\tau,$$

где  $F_{BO}$  – падение магнитного напряжения в воздушном зазоре при режиме холостого хода. Расчеты и опыт эксплуатации показывают, что при  $K_y < 1$  магнитная устойчивость машины снижается. Для повышения магнитной и потенциальной устойчивости существуют специальные способы.

## 6.7 Способы повышения потенциальной устойчивости

Поскольку тяговые электродвигатели работают в режимах, близких к предельным, то следует заранее оговориться, что добиться абсолютной потенциальной устойчивости и отсутствия дугообразования не удастся. Однако существует ряд способов повышения потенциальной устойчивости, к основным из которых относят:

- 1) применение расходящихся воздушных зазоров;
- 2) использование специальных полюсных наконечников;
- 3) применение компенсационных обмоток.

Исследования показывают, что для получения одинакового ограничивающего воздействия на реакцию якоря воздушный зазор должен возрастать по линейной зависимости, от середины главного полюса к его краям, то есть его можно описать формулой

$$\delta_x = \delta_c [1 + (K_p - 1)X] ,$$

где  $K_p$  – коэффициент раскрытия зазора;  $X$  – относительное расположение текущей точки  $x$  под полюсом (рис. 6.12),

$$X = 2x/B_r ;$$

$$K_p = \delta_k / \delta_c .$$

Обеспечить точное выполнение уравнения технологически сложно и поэтому на практике чаще используют зазоры следующих трех видов (рис. 6.13).

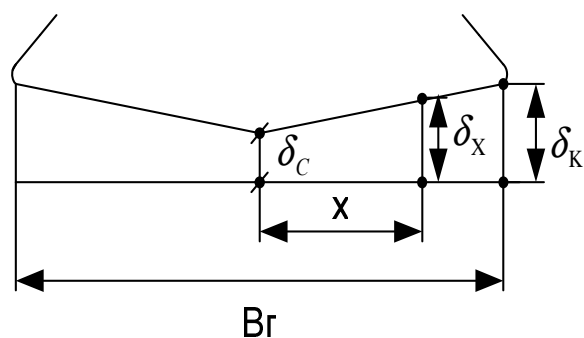


Рисунок 6.12 – Основные размеры расходящегося воздушного зазора

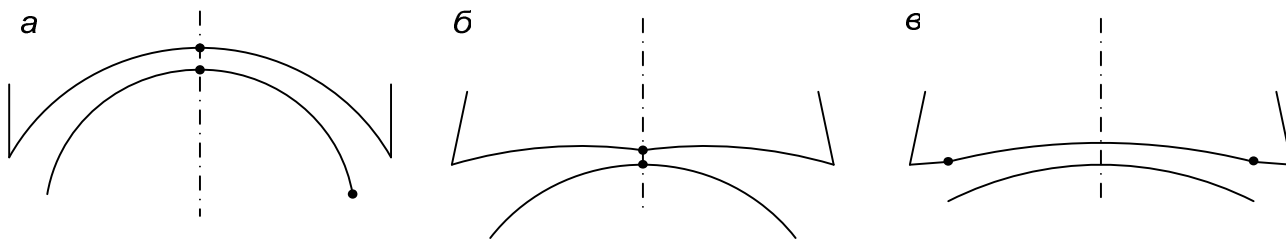


Рисунок 6.13 – Виды воздушных зазоров: а – эксцентричный; б – клиновидный; в – частично расходящийся

Чаще всего применяют эксцентричный зазор, при котором поверхность полюса выполняется одним радиусом.

Реже применяют клиновидные и частично расходящиеся зазоры.



Рисунок 6.14 – Вид полюсного наконечника

Как уже отмечалось, на распределение индукции под полюсом заметное влияние оказывает форма рога полюсного наконечника. Желательно для машин без компенсационной обмотки, чтобы рог имел постепенное сужение с сильно заостренным концом (рис. 6.14). При этом конец рога при больших нагрузках насыщается за счет реакции якоря и ограничивает поток реакции якоря.

Однако и применение зазора, и удлинение и заострение рога уступают по своей эффективности компенсационным обмоткам.

#### 6.8. Компенсационная обмотка и ее влияние на потенциальные условия

Применение компенсационной обмотки является наиболее эффективным способом повышения потенциальной устойчивости тяговых двигателей и наиболее совершенной мерой подавления поперечной реакции якоря.

Компенсационная обмотка позволяет снизить максимальное межламельное напряжение приблизительно на 25 % в стационарных режимах и на 40...50 % в переходных режимах.

Кроме того, компенсационная обмотка, нейтрализуя искажающее влияние реакции якоря, позволяет получить более равномерное распределение магнитного потока под главным полюсом.

Применение компенсационной обмотки благоприятно и в конструкционном плане. Применение ее позволяет уменьшить число витков как главных, так и добавочных полюсов, а значит сократить количество меди, затрачиваемой на машину.

Причем, сокращение числа витков главных полюсов осуществляется потому, что с применением компенсационной обмотки можно уменьшить воздушный зазор и снизить потоки рассеяния.

Сокращение числа витков добавочных полюсов происходит из-за того, что в основном реакцию якоря компенсирует компенсационная обмотка.

Хотя с другой стороны, компенсационная обмотка это лишний узел в машине, а это усложнение конструкции, увеличение числа возможных дефектов. Да и само расположение компенсационной обмотки снижает ремонтпригодность. Дело в том, что компенсационная обмотка закладывается в пазы двух соседних главных полюсов.

Конструктивное решение компенсационной обмотки общепринято, её выполняют катушечной, как показано на рисунке 6.15. Особенность укладки заключается в том, что ее укладывают не в радиальные пазы, а в пазы главного полюса, параллельные дополнительным полюсам.

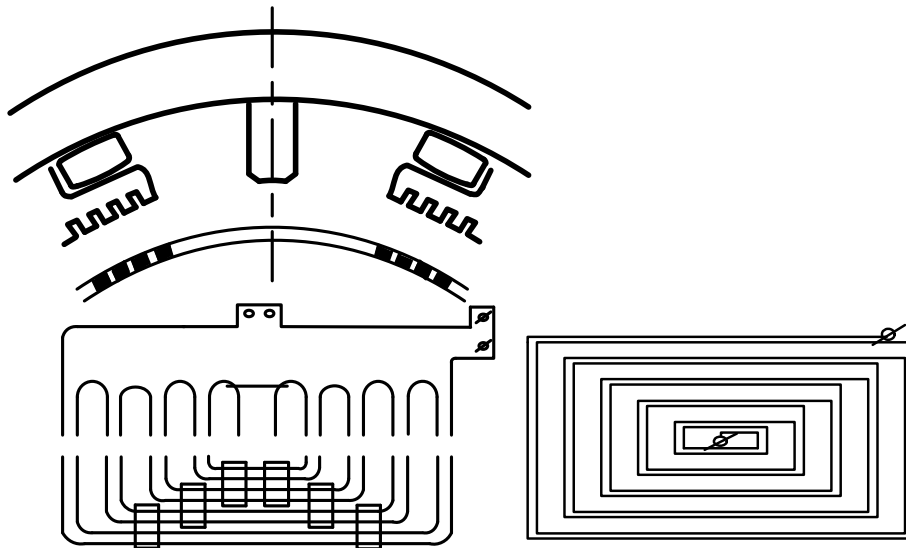


Рисунок 6.15 – Конструкция компенсационной обмотки

Электромагнитные процессы, происходящие в двигателе при наличии компенсационной обмотки, показаны на рис. 6.16.

Действие компенсационной обмотки зависит от степени компенсации

$$K_k = \frac{F_{кох}}{F_{рях}} = \frac{A_{ко}\alpha\tau}{A\alpha\tau} = \frac{A_{ко}}{A},$$

где  $F_{кох}$ ,  $F_{рях}$  – мдс компенсационной обмотки и реакции якоря на любом расстоянии  $x$  от середины полюса;  $A_{ко}$  – линейная нагрузка компенсационной обмотки

$$A_{ко} = \frac{N_{ко} \cdot I}{a_{ко}\alpha\tau},$$

где  $N_{ко}$  – число проводников компенсационной обмотки на полюс;  $a_{ко}$  – число параллельных ветвей компенсационной обмотки

$$a_{ко} = 1.$$



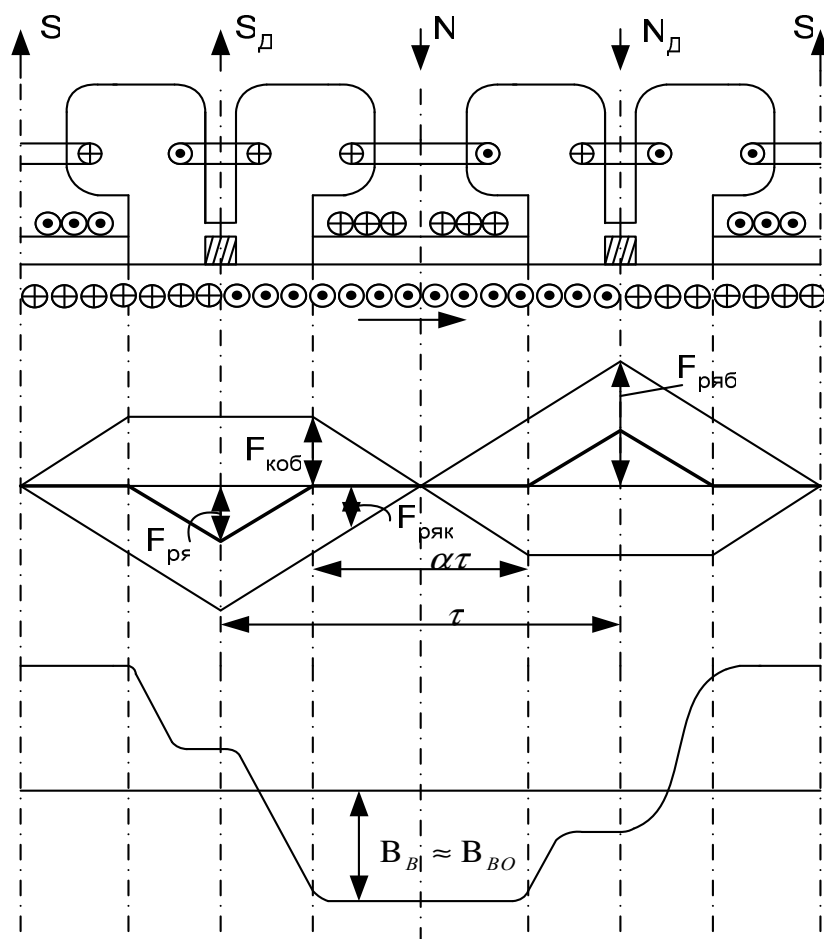


Рисунок 6.16 – Схема расположения и действия компенсационной обмотки

Как правило, при расчетах применяют  $K_k = 0,8 \dots 1,2$ , на диаграммах изображена  $F_{ря\alpha}$  в точках  $\alpha$  т. е.

$$F_{ря\alpha} = F_{коб} = \frac{1}{2} A \alpha \tau,$$

где  $F_{ря\alpha}$  – МДС реакции якоря под краем полюса.

Наибольшее расчетное значение МДС реакции якоря под серединой дополнительного полюса при  $K_k = 1$  можно определить следующим образом

$$F_{ря}' = F_{ряб} - F_{коб} = F_{ряб}(1 - \alpha) = \frac{1}{2} A \tau (1 - \alpha).$$

В этом случае МДС дополнительного полюса может быть рассчитана на компенсацию  $F_{ря}'$ , которая, конечно же, меньше, чем в двигателях без компенсационной обмотки.

В тяговых двигателях с компенсационной обмоткой нет необходимости в изменении формы зазоров под главным полюсом и применении расходящихся

зазоров. Поэтому в машинах с компенсационными обмотками используют обыкновенный концентрический зазор. При чем сам зазор уменьшают и в двигателях

- $P_H$  до 300 кВт –  $\delta = 3...4$  мм;
- $P_H$  более 300 кВт –  $\delta = 4,5...6$  мм.

Следует отметить, что рассматривался вариант при условии, что обмотка расположена равномерно по полюсу.

На самом деле обмотка сконцентрирована по пазам, число которых колеблется от  $Z'_{ко} = 6...12$ .

Поэтому из-за зубчатой структуры полюса возникает существенная неравномерность индукции.

Изображая фрагмент рисунка 6.16 крупным планом (рис. 6.17) видим, что

$$F_{вб} = F_{вос} + \frac{1}{2} t_{ко} A_{ко},$$

где  $t_{ко}$  – зубцовое деление компенсационной обмотки

$$t_{ко} = \frac{B\Gamma}{Z'_{ко}} = \frac{\alpha\tau}{Z'_{ко}},$$

тогда при условии, что  $K_K = 1$

$$F_{вб} = F_{вос} \left( 1 + \frac{\alpha\tau A_{ко}}{2Z'_{ко} F_{вос}} \right).$$

Заменив в формуле

$$K_y = \frac{\alpha\tau A_{ко}}{2F_{вос}},$$

можно записать

$$F_{вб} = F_{вос} \left( 1 + \frac{K_y}{Z'_{ко}} \right).$$

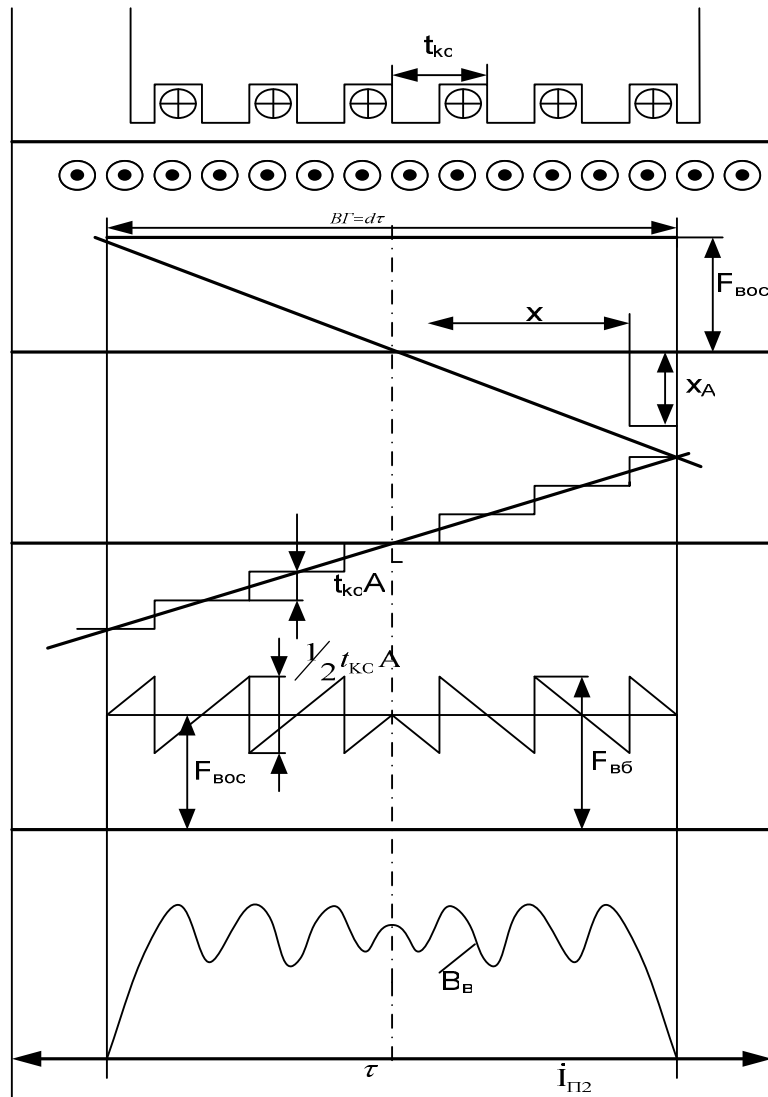


Рисунок 6.17 – Влияние компенсационной обмотки на распределение индукции и МДС:

$F_{B0C}$  – среднее значение МДС холостого тока в воздушном зазоре;

$B_{B0}$  – распределение индукции

Зная максимальную и среднюю величины мдс, можно определить коэффициент искажения формы мдс

$$K_u \cong \frac{F_{B6}}{\alpha F_{B0C}} \approx \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \frac{K_y}{Z'_{KO}} \right).$$

В действительности коэффициент искажения несколько выше из-за дискретности расположения не только компенсационной обмотки, но и обмотки якоря. Учитывается эта неравномерность с помощью коэффициента воздушного зазора  $K_B$ , тогда

$$K_u \cong \frac{1}{\alpha} \left( K_B + \frac{K_y}{Z'_{KO}} \right).$$

Определение коэффициента воздушного зазора уже приводилось. Ступенчатость МДС сглаживают, придавая пазам компенсационной обмотки скосы в пределах зубцового деления компенсационной обмотки  $t_{ко}$ .

Несмотря на явные преимущества конструкции, ее усложнение значительное, и поэтому такую обмотку применяют, лишь убедившись в ее целесообразности.

Обычно применение обмотки считается оправданным, когда отношение максимальной скорости к средней больше двух.

Компенсационную обмотку применяют всегда при мощности двигателя  $P_H \geq 700$  кВт.

Изготовленные заранее катушки закладываются в пазы и крепятся клиньями. Принцип крепления обмотки такой же, как и у обмотки якоря. Выбор изоляционного покрытия осуществляется так же, как и для обмотки якоря.

Развитие современной технологии позволяет создавать машины с беспазовым якорем, что тоже повышает их потенциальную устойчивость, при этом обмотка наклеивается на гладкую поверхность якоря.

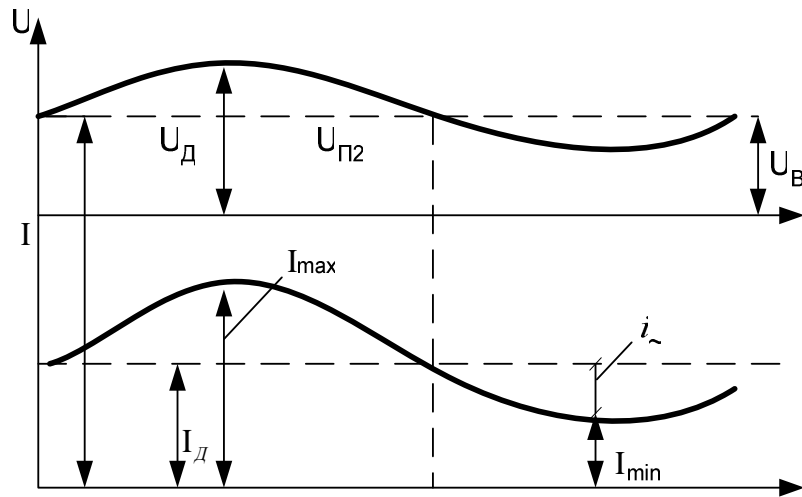
## 6.9 Тяговые двигатели пульсирующего тока

Условия питания тяговых двигателей локомотивов с выпрямительными установками значительно отличаются от условий питания двигателей ЭПС постоянного тока.

На участках железных дорог, электрифицированных постоянным током, применяются многофазные схемы выпрямления с числом фаз от 6 до 24. При этом напряжение практически постоянно (пульсации не более 3...5 %). На локомотиве из-за ограниченности пространства ставить такие преобразователи не представляется возможным, и поэтому применяют либо двухполупериодные, либо мостовые схемы выпрямления. И как следствие этого пульсации возрастают.

При включении последовательно с тяговым двигателем сглаживающего реактора переменная составляющая выпрямленного напряжения по сути полностью в нем уравнивается, поскольку индуктивное сопротивление реактора значительно больше индуктивного сопротивления обмоток двигателя.

Пульсирует лишь ток, и в связи с этим тяговые двигатели электровозов переменного тока получили название «тяговые двигатели пульсирующего тока». Идеализированные формы кривых напряжения и тока двигателя представлены на рисунке 6.18.



Рисунке 6.18 – Кривые напряжения и тока ТЭД

Степень непостоянства тока можно оценить коэффициентом пульсации тока

$$K_n = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{i}{I_c}.$$

Коэффициент сглаживания необходимо выбирать таким, чтобы коэффициент пульсаций не превышал 0,2...04 во всех режимах работы тягового двигателя. Можно, конечно, достичь и более высокой степени сглаживания, но при этом увеличиваются затраты на реакторное оборудование. Поэтому принимают указанное компромиссное решение.

Чем же вредны пульсации выпрямленного тока?

При токах тягового двигателя более 300 А возникают следующие негативные явления:

- значительная трансформаторная ЭДС в коммутирующих секциях, соизмеримая по величине с реактивной ЭДС (т. е. 3...6 В);
- дополнительные потери и нагревание магнитных массивных участков магнитопровода: якоря, сердечников полюсов, остова и т. д.

При этом переменная составляющая тока не создает постоянного момента, ради которого и существует тяговый двигатель, а приводит лишь к ряду негативных явлений. Для того чтобы избавиться от этих явлений, используют различные способы, формально которые можно разделить на две большие группы по месту их применения:

- 1) внешние (использующие дополнительное оборудование);
- 2) внутренние (изменение конструкции двигателя путем внесения ряда особенностей в его исполнение относительно тягового двигателя постоянного тока).

## 6.10 Внешние способы сглаживания пульсации

К внешним способам относятся применение сглаживающего реактора и шунтирование обмотки возбуждения постоянным резистором. Здесь целесообразно для наглядности привести схему включения этих элементов (рис. 6.19).

Что касается последовательного включения сглаживающего реактора и тягового двигателя, то здесь нет каких-либо особенностей в сглаживании пульсации. Наибольший интерес представляет шунтирование обмотки возбуждения постоянным резистором  $R_{ш1}$ .

Если пренебречь незначительным падением напряжения в сглаживающем реакторе, то постоянная составляющая тока в двигателе будет определяться, как

$$I \cong \frac{U_B - C_V \Phi V}{r_D}.$$

Амплитудные же значения переменных составляющих  $IK_{\Pi I}$  и  $U_B K_{\Pi U}$  (ток на коэффициент пульсации и напряжение на коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения) будут связаны соотношением

$$mIK_{\Pi I} = \frac{U_B \cdot K_{\Pi U}}{\sqrt{(\Sigma r)^2 + (\Sigma x)^2}},$$

где  $m$  – число параллельно включенных двигателей;  $K_{\Pi I}$  – коэффициент пульсаций тока;  $K_{\Pi U}$  – коэффициент пульсаций напряжения;  $\Sigma r$  – сумма активных сопротивлений реактора и двигателей;  $\Sigma x$  – сумма реактивных сопротивлений реактора и двигателей.

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения

$$K_{\Pi U} = \frac{U_{\Pi 2}}{U_B},$$

где  $U_{\Pi 2}$  – амплитуда основной (второй) гармоники пульсаций напряжения.

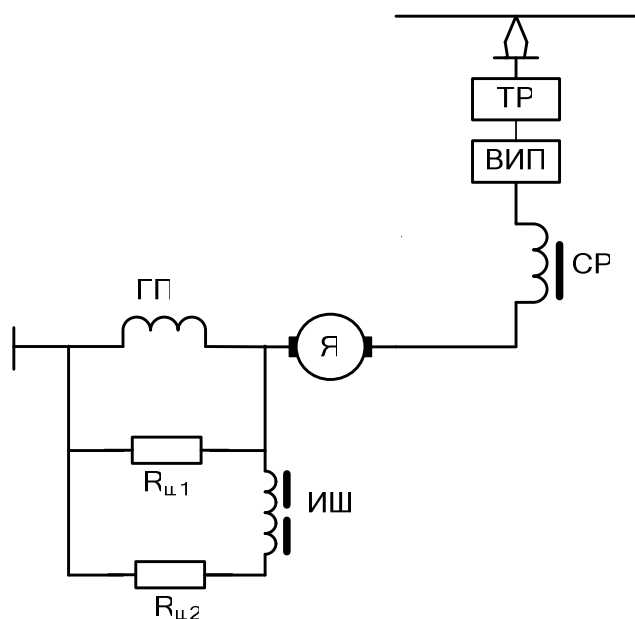


Рисунок 6.19 – Схема подключения элементов сглаживания пульсаций: ТР – трансформатор; ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; СР – сглаживающий реактор; ГП – обмотка возбуждения;  $R_{ш1}$  – постоянное активное шунтирующее сопротивление;  $R_{ш2}$  – активное сопротивление в цепи регулируемого шунтирования

Сумма активных сопротивлений реактора и двигателей

$$\Sigma r = r_p + r_d / m ,$$

где  $r_p$  – активное сопротивление реактора;  $r_d$  – активное сопротивление двигателя.

Сумма реактивных сопротивлений цепи

$$\Sigma x = 4\pi f_c \left( L_p + \frac{L_d}{m} \right) ,$$

где  $f_c$  – частота сети;  $L_p$  – индуктивность реактора;  $L_d$  – индуктивность двигателя.

Из приведенной ранее формулы можно определить коэффициент пульсации. Это позволяет:

- 1) проследить влияние всех величин на коэффициент пульсации;
- 2) определить значение коэффициента пульсации для разных значений составляющих

$$K_{\text{пл}} \cong \frac{K_{\text{пу}} U_{\text{в}}}{4\pi f_c \left( L_p + \frac{L_d}{m} \right) \cdot I \cdot m} .$$

Совершенно очевидно, что при возрастании индуктивности  $L_p$  и  $L_d$  коэффициент пульсации тока уменьшается так же, как и с ростом частоты.

Возвращаясь к ранее сказанному, можно дополнить, что  $K_{\text{пл}} = 0$  возможно

лишь при бесконечно большой индуктивности  $L_p$ . Поэтому  $K_{\text{пл}}$  выдерживают в определенных пределах.

На первый взгляд, из формулы следует, что и увеличение тока приводит к снижению коэффициента пульсации. Однако это не так. Дело в том, что зависимость  $L_p = f(I)$  нелинейна, представлена на рис. 6.20.

На практике сглаживающие реакторы со стальным сердечником выполнены таким образом, чтобы

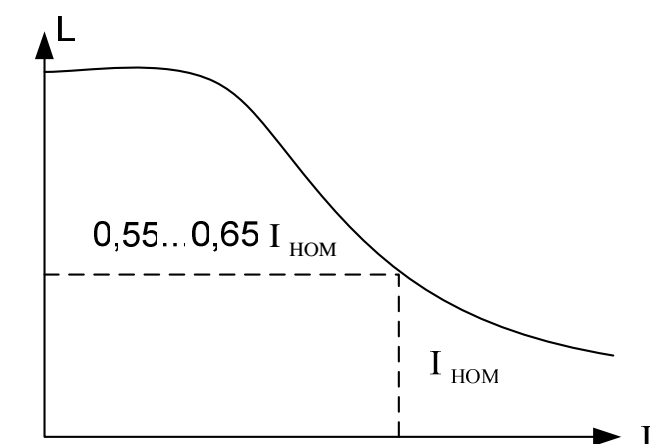


Рисунок 6.20 – Вид зависимости индуктивности от тока

индуктивность при номинальной нагрузке составляла 0,55...0,65 начального, ненасыщенного значения.

Кроме того, переменная составляющая тока будет в основном замыкаться через резистор  $R_{ш2}$  так как индуктивное сопротивление главных полюсов значительно больше, чем  $R_{ш1}$ , а активное сопротивление очень мало.

Из-за нелинейности изменения индуктивности от тока скомпенсировать указанными методами полностью пульсации тока не удастся, в связи, с чем возникают побочные эффекты:

- а) знакопеременный момент;
- б) ухудшение коммутации тягового двигателя;
- в) добавочные потери;
- г) трансформаторная ЭДС.

### 6.11 Коммутация переменной составляющей тока

В начале представим изменение пульсирующего тока от  $+i$  до  $-i$  (рис. 6.21), т. е. коммутацию тока в тяговых двигателях, как мы ее рассматривали для двигателей постоянного тока.

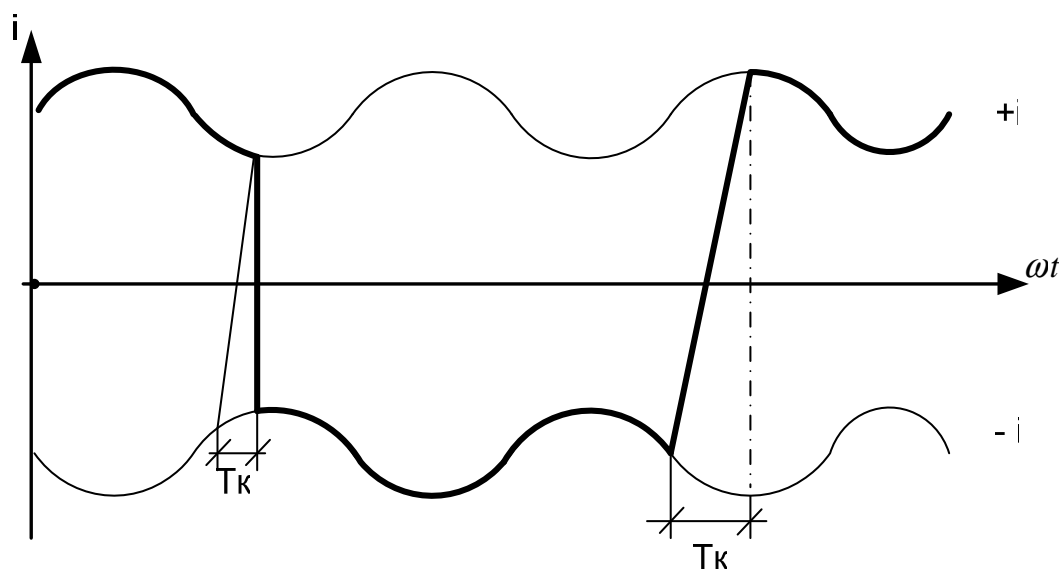


Рисунок 6.21 – Диаграмма коммутации двигателя пульсирующего тока

Как видно из рисунка периоды коммутации могут как совпадать с вершинами токов  $+i$ ,  $-i$ , так и не совпадать, а значит, период коммутации изменяется.

Если изменяется период коммутации, изменяется и величина  $\frac{di}{dt}$  т. е.

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{2i_a(1 + K_{пл})}{T_k} \left(\frac{di}{dt}\right)_{\min} = \frac{2i_a(1 - K_{пл})}{T_k}.$$

Тогда при пульсирующем питании реактивная э.д.с.  $e_{рпп}$  может быть определена как

$$e_{рпп} = e_p + e_{рп},$$



где  $e_p$  – постоянная составляющая;  $e_{rp}$  – переменная составляющая реактивной ЭДС.

Кроме реактивной ЭДС в коммутируемых проводниках наводится трансформаторная ЭДС, вызванная пульсациями магнитного потока главных полюсов

$$e_T = -\omega_c \frac{d\Phi_{\Pi}}{dt},$$

и соответственно усложняется задача компенсации  $e_{rpp}$  и  $e_T$ . Для этого в зоне дополнительных полюсов необходимо создать компенсирующее поле, сцепленное с коммутируемыми проводниками. Для того чтобы компенсация была полной и в то же время легко можно было бы определить  $e_{kpp}$ , (компенсационную ЭДС) принято разделять переменную

$$e_{kp} = e_{rp} + e_T \quad (2)$$

и постоянную составляющую ЭДС

$$e_k = e_p.$$

Обычно последнюю составляющую определяют так же, как и для двигателей постоянного тока

## 6.12 Переменная составляющая момента

Переменная составляющая тока взаимодействует с магнитным потоком главных полюсов и вызывает знакопеременный момент

$$M_{\omega} = K_{\Pi} M_{\omega} \sin \omega t,$$

где  $M_{\omega}$  – электромагнитный вращающийся момент;  $\omega$  – угловая частота переменной составляющей тока при частоте 100 Гц.

При  $K_{\Pi} = 0,2 \dots 0,4$  момент  $M_{\omega}$  значителен по величине, но так как частота тока высока (100 Гц) заметного влияния на работу двигателя он не оказывает.

Для того чтобы уменьшить добавочные потери из-за перемагничивания в стали за счет присутствия переменной составляющей тока конструктивно тяговый двигатель пульсирующего тока несколько отличается от тягового двигателя постоянного тока.

Коренное отличие заключается в том, что остов тягового двигателя пульсирующего тока часто выполняют или шихтованным или частично шихтованным (рис. 6.22).

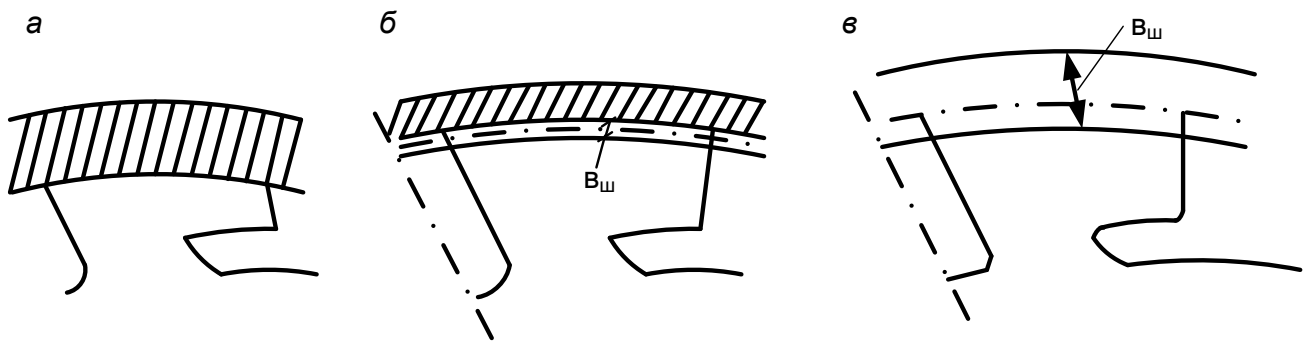


Рисунок 6.22 – Способы выполнения остова тягового двигателя: а – массивный (литой) остов; б – частично шихтованный остов; в – шихтованный остов

### 6.13 Особенности коммутационного процесса двигателей пульсирующего тока

Для того чтобы определить особенности коммутационного процесса, необходимо поставить четко задачу. И так, для полной компенсации необходимо, чтобы

$$e_k = e_p;$$

$$e_{kp} = e_{rp} + e_T.$$

Кроме того, отмечалось, что  $e_p$  можно определить, построив диаграмму пазового поля, как для двигателей постоянного тока. А также было замечено, что наибольшую трудность представляет собой определение  $e_{rp}$  и  $e_T$ .

В связи со сказанным: задача – что же это за составляющие, как их определять, и как компенсировать, если они вредны.

Основные трудности в их определении и компенсации заключаются в том, что их формы несинусоидальны и кроме того, они сдвинуты относительно друг друга на довольно значительный угол.

### 6.14 Определение переменной составляющей $e_{kp}$

Для определения  $e_{kp}$  необходимо построить векторную диаграмму (рис. 6.23). Поскольку величины характеризуются не только модулем, но и направлением, перейдем от обозначений  $e_{kp} = e_{rp} + e_T$  к  $\dot{E}_{kp} = \dot{E}_{rp} + \dot{E}_T$ .

Как уже отмечалось, первопричиной возникновения различных ЭДС является переменная составляющая тока. Обозначим ее как  $\dot{I}_{p2}$  (2 – характеризует основную гармонику).

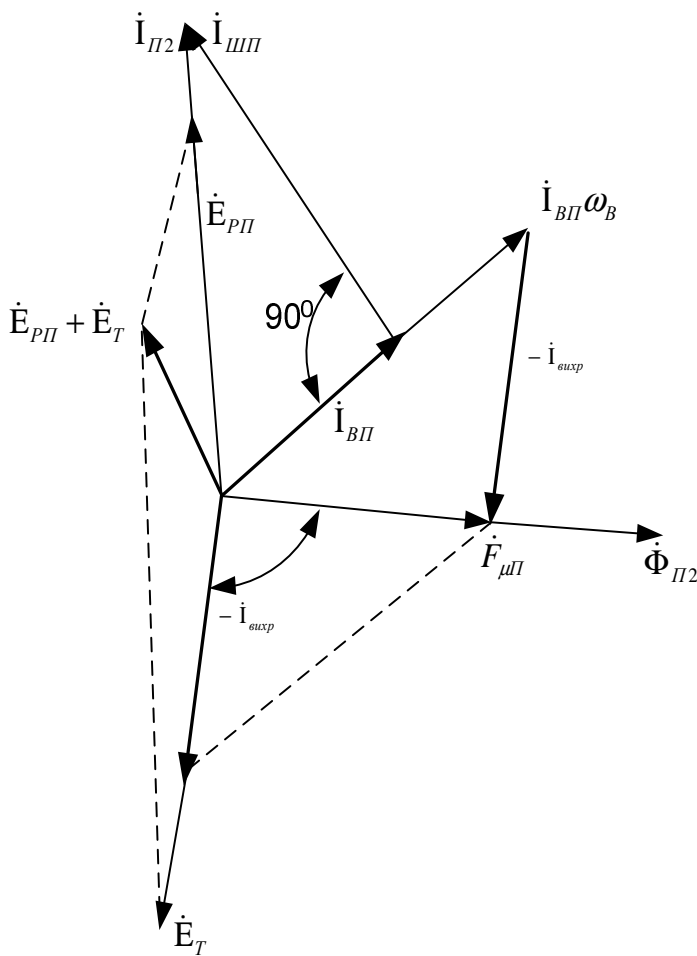


Рисунок 6.23 – Векторная диаграмма  $\dot{E}_{рп}$  и  $\dot{E}_T$

$\dot{I}_{п2}$  совпадает по фазе с переменной составляющей реактивной ЭДС  $\dot{E}_{рп}$ . Известно, что при шунтировании обмотки возбуждения резистором  $R_{ш}$  ток  $\dot{I}_{п2}$  распадается на два тока:

$$\dot{I}_{п2} = \dot{I}_{вп} + \dot{I}_{шп},$$

где  $\dot{I}_{вп}$  – ток в обмотке возбуждения;  $\dot{I}_{шп}$  – ток в шунтирующем резисторе.

Поскольку в одном случае шунт – это чисто активное сопротивление, а обмотка возбуждения – практически чисто реактивное сопротивление, то угол между ними стремится к  $90^\circ$ .

Трансформаторная ЭДС будет определяться магнитным потоком  $\Phi_{п2}$  (вернее основной гармоникой переменной части магнитного потока).

Вектор  $\dot{\Phi}_{п2}$  определяется положением вектора мдс намагничивания  $\dot{F}_{\muп}$

$$\dot{F}_{\muп} = \dot{I}_{вп} \omega_B - \dot{I}_{вихр},$$

где  $\dot{I}_{вихр}$  – магнитодвижущая сила вихревых токов в магнитной цепи главных полюсов, пропорциональная току.

Вихревые токи отстают по фазе на  $90^\circ$  от  $\dot{\Phi}_{п2}$ . Настолько же отстает по фазе и вектор  $\dot{E}_T$ , совпадающий по фазе с  $\dot{I}_{вихр}$ .

Геометрическая сумма векторов  $\dot{E}_T$  и  $\dot{E}_{рп}$  дает фазу и модуль переменной составляющей ЭДС  $\dot{E}_{кп}$ .

Из диаграммы можно сделать один очень интересный вывод:

При уменьшении вихревых токов  $\dot{E}_T$  оказывается почти полностью в противофазе относительно  $\dot{E}_{рп}$  и в значительной мере ее компенсирует. Но положение осложняется тем, что  $\dot{E}_T$ , по вполне понятным причинам, не зависит

от частоты вращения  $n$ , а  $\dot{E}_{rp} \equiv n$ . Поэтому говорить о компенсирующем влиянии трансформаторной ЭДС в основном не приходится.

## 6.15 Компенсация реактивной ЭДС дополнительными полюсами двигателей пульсирующего тока

Для начала рассмотрим работу дополнительных полюсов с нешихтованными сердечниками полюсов и остова.

По условиям компенсации постоянной составляющей реактивной ЭДС  $e_p$  магнитодвижущая сила дополнительного полюса (полная переменная)

$$\dot{E}_{\text{дп}} = \dot{I}_{\text{п2}} \omega_{\text{д}}$$

должна быть направлена навстречу  $\dot{I}_{п2}$ . Рассмотрим это на диаграмме (рис. 6.24).

Магнитодвижущую силу можно разложить на две составляющие:

- 1) МДС находящуюся в фазе с переменной составляющей магнитного потока  $\dot{\Phi}_{\text{дп}}(\dot{F}_{\text{мдп}})$ ;
- 2) МДС вихревых токов  $\dot{I}_{\text{вихр.д}}$ , располагающуюся под углом  $90^\circ$  к вектору  $\dot{\Phi}_{\text{дп}}$

$$\dot{I}_{п2}\omega_d = \dot{F}_{удп} + \dot{I}_{вихр.д}.$$

Из-за больших значений в не доп. полюсе при не шихтованных с шихтованных сердечниках вихре- дечнике полюса и остова вых токов угол фазового сдвига между мдс и потоком  $\Phi_{\text{ДП}}$  значителен и составляет обычно  $50...70^\circ$ .

Переменная составляющая магнитного потока  $\dot{\Phi}_{\text{дп}}$  раскладывается на две составляющие:

- 1) компенсирующий поток в зоне коммутации  $\dot{\Phi}_{\text{кп}}$ ;
- 2) поток рассеяния дополнительного полюса  $\dot{\Phi}_{\text{дрп}}$

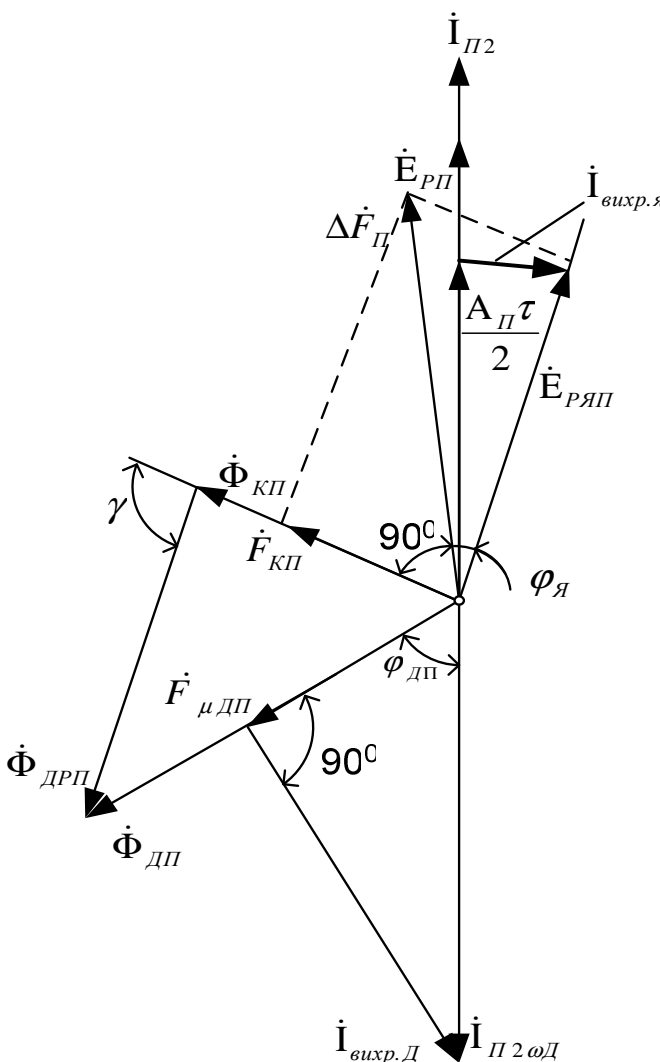


Рисунок 6.24 – Векторная диаграмма показателей дополнительного полюса при не шихтованных сердечнике полюса и остова

$$\dot{\Phi}_{\text{дп}} = \dot{\Phi}_{\text{кп}} + \dot{\Phi}_{\text{дрп}}.$$

Угол фазового сдвига  $\gamma$  между  $\dot{\Phi}_{\text{кп}}$  и  $\dot{\Phi}_{\text{дрп}}$  зависит от структуры магнитной цепи, по которой замыкается поток. При нешихтованных магнитопроводах величины  $\dot{\Phi}_{\text{кп}}$  и лежащая с ним в фазе мдс дополнительных полюсов  $\dot{F}_{\text{кп}}$  очень сильно ограничены воздействием вихревых токов.

Из диаграммы видно, что действие вихревых токов настолько велико, что  $\dot{F}_{\text{кп}}$  оказывается в одном квадранте с  $\dot{E}_{\text{рп}}$  и не в состоянии компенсировать реактивную ЭДС. В этих условиях переменная составляющая магнитного поля в зоне коммутации будет определяться величиной мдс  $\Delta \dot{F}_{\text{п}}$ . Значение ее зависит от  $\dot{F}_{\text{кп}}$  (компенсационной МДС и МДС создаваемой реакцией якоря  $\dot{F}_{\text{ряп}}$ ) верки ее переменной составляющей

$$\dot{F}_{\text{ряп}} = \frac{1}{2} \dot{A}_{\text{п}} \tau - \dot{I}_{\text{вихр.я}},$$

где  $\dot{A}_{\text{п}} \approx K_{\text{пI}} \dot{A}$  – переменная составляющая линейной нагрузки якоря, лежащая в фазе с  $\dot{I}_{\text{п2}}$ ;  $\dot{I}_{\text{вихр.я}}$  – МДС с вихревых токов в магнитной цепи якоря, лежит под углом  $90^\circ$  к  $\dot{F}_{\text{ряп}}$ .

Опять же из диаграммы видно, что величина  $\dot{I}_{\text{вихр.я}}$  невелика, поскольку сердечник якоря имеет шихтованную структуру.

При полной компенсации  $\Delta F_{\text{п}} = 0$ .

Влияние вихревых токов очень велико. Одним из способов улучшения условий коммутации является снижение (уменьшение) вихревых токов. Снизить значение вихревых токов можно шихтовкой дополнительного полюса.

Из диаграммы видно, что снижение  $\dot{I}_{\text{вихр.я}}$  приводит к уменьшению угла  $\phi_{\text{дп}}$  (фазового угла) увеличивается  $\dot{\Phi}_{\text{дп}}$ . Кроме того, применение шихтованных сердечников уменьшает поток рассеяния  $\dot{\Phi}_{\text{дрп}}$  и угол  $\gamma$ .

Эти положительные свойства «поворачивают» диаграмму против часовой стрелки, и  $\dot{F}_{\text{кп}}$  начинает компенсирующее действие, а  $\phi \rightarrow 180^\circ$ .

## 6.16 Способы улучшения коммутации тяговых двигателей пульсирующего тока

### 6.16.1 Шихтовка дополнительного полюса и применение компенсационной обмотки

Шихтовка магнитной системы, сопровождающаяся уменьшением вихревых токов приводит к смещению трансформаторной ЭДС за счет уменьшения угла фазового сдвига  $\varphi_T$ . Для сравнения рассмотрим две диаграммы ЭДС в коммутирующих секциях (рис. 6.25).

В обычных случаях остаточная ЭДС

$$\Delta \dot{E}_\Pi = \dot{E}_{рп} + \dot{E}_T + \dot{E}_{кп}.$$

Переменная составляющая  $\Delta \dot{E}_\Pi$  изменяется по модулю и по фазе при изменении режимов работы двигателя. Примем, чем больше участков магнитной цепи шихтовано, тем меньше значения вихревых токов, а значит и значение  $\Delta E_\Pi$ .

По значению величины  $\Delta E_\Pi$  оценивают качество коммутации. Зависимость степени искрения от величины  $\Delta E_\Pi$  можно показать диаграммой.

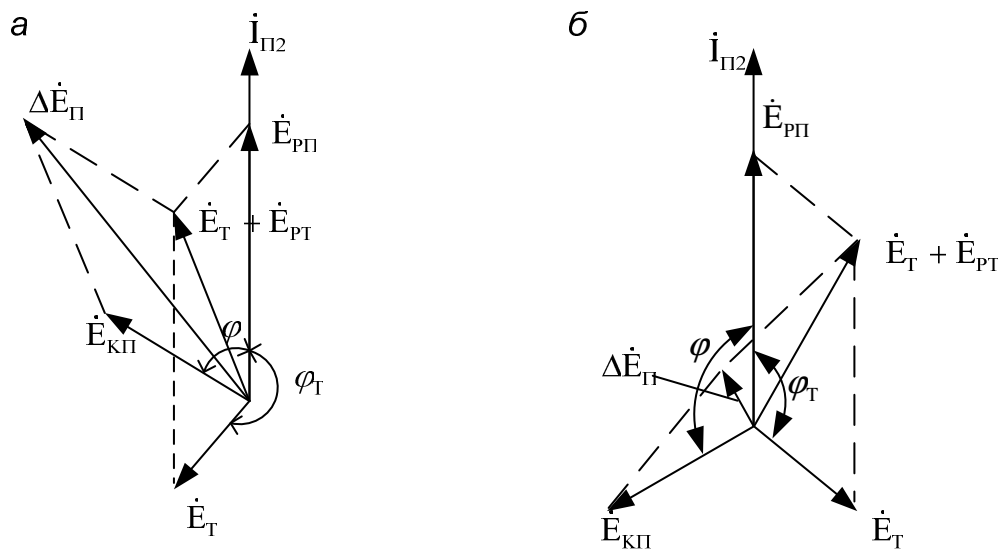


Рисунок 6.25 – Векторные диаграммы ЭДС в коммутируемой секции:

а – для нешихтованного дополнительного полюса;

б – для шихтованного дополнительного полюса

### 6.16.2 Снижение переменной составляющей остаточной ЭДС за счет компенсационной обмотки

Применение компенсационной обмотки это наиболее эффективная мера уменьшения  $\Delta E_\Pi$  (рис. 6.26).

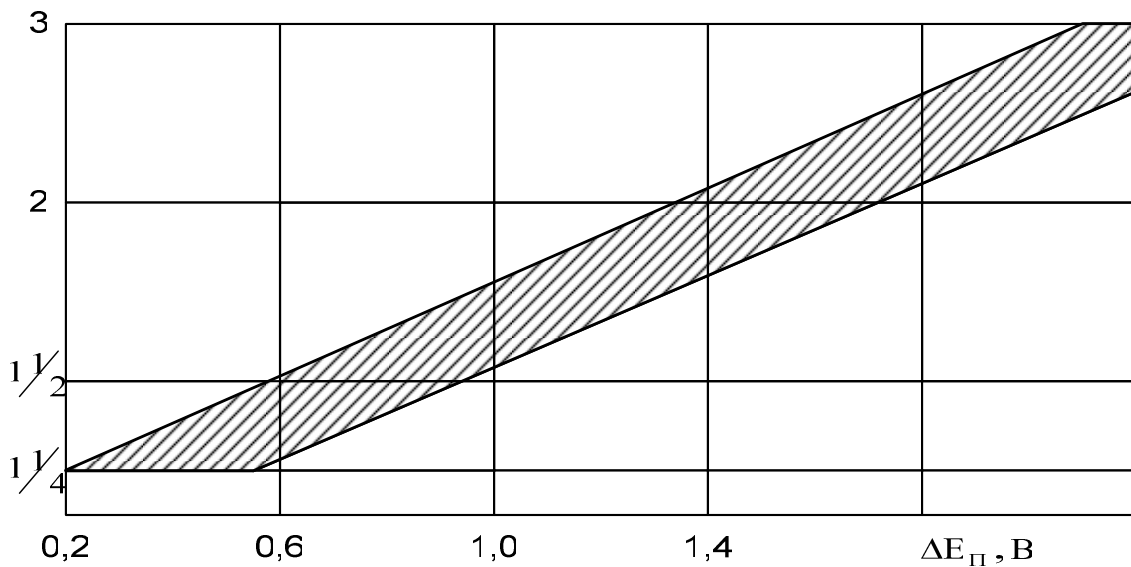


Рисунок 6.26 – Прямолинейная зависимость класса коммутации от фактора искрения

В соответствии с конструкцией машины магнитные потоки реакции якоря и компенсационной обмотки проходят по одним и тем же участкам магнитной цепи.

И в связи с этим вихревые токи  $\dot{I}_{\text{вихр.я}}$  воздействуют как на МДС якоря, равную  $\frac{1}{2} A_{\text{п}} \tau$  (переменная составляющая реакции якоря), так и на переменную составляющую МДС компенсационной обмотки  $\frac{1}{2} A_{\text{кп}} \alpha \tau$ .

При этом переменные составляющие МДС, действующие в зоне коммутации  $\dot{F}_{\text{ряп}}$  и  $\dot{F}_{\text{коп}}$  во всех режимах направлены друг против друга.

При их взаимодействии остаточное значение мдс

$$\dot{F}'_{\text{ряп}} = \dot{F}_{\text{ряп}} - \dot{F}_{\text{коп}} \cong \dot{F}_{\text{ряп}}(1 - \alpha).$$

Последнее равенство справедливо, потому что  $A_{\text{к}} \approx A$ .

Даже если не работают дополнительные полюсы, остаточная МДС, действующая в зоне коммутации, не превышает

$$\Delta \dot{F}'_{\text{п1}} = \dot{F}_{\text{ряп}}(1 - \alpha),$$

и соответствующая ей ЭДС в коммутирующих секциях

$$\Delta E_{\text{п1}}' \approx \Delta E_{\text{п1}}(1 - \alpha) \cong e_{\text{р}} K_{\text{пI}}(1 - \alpha)$$

при обычных значениях  $\alpha = 0,65 \dots 0,7$

$$\Delta E_{\text{п1}}' = (0,3 \div 0,35) e_{\text{р}} K_{\text{пI}}.$$

Величина это очень небольшая и не вызывает недопустимого искрения даже при неработающих дополнительных полюсах. Опыт применения компенсационных обмоток у тяговых двигателей подтверждает их более высокие коммутационные свойства.

### 6.17 Неустановившиеся процессы в цепи тяговых двигателей

Различают два основных вида переходных процессов:

- 1) электромеханические;
- 2) электрические.

**Электромеханические** процессы связаны с изменением нагрузки на валу тягового двигателя. Они, как правило, протекают при постоянном напряжении. Например, увеличение тяговой силы электровоза при выходе с ровного участка на подъем. Ток в двигателе изменяется, но это постепенные изменения, которые, как правило, не приводят к серьезным последствиям. Значительно сложнее **электрические** переходные процессы.

Причем электрические переходные процессы так же можно разделить на две группы:

- 1) эксплуатационные;
- 2) аварийные.

К **эксплуатационным** переходным процессам относят: трогание с места и разгон электровоза, переход с одного соединения на другое, изменение степени ослабления поля и т. д. К **аварийным** – броски напряжения в контактной сети, потерю питания с последующим восстановлением, режимы короткого замыкания, в частности круговой огонь на коллекторе.

Особенно опасны резкие толчки напряжения или отрывы токоприемника от контактного провода. При этом происходят процессы, пояснить которые можно диаграммой (рис. 6.27).

Из диаграмм следует, что при резком изменении напряжения ток падает до нуля, а магнитный поток до остаточного значения  $\Phi_{ост}$ .

Мгновенное восстановление напряжения не сопровождается мгновенным возрастанием магнитного потока до  $\Phi_y$ . Медленное нарастание магнитного потока обеспечено вихревыми токами. При этом ток двигателя мгновенно, или быстрее, нарастает, чем поток и достигает величины

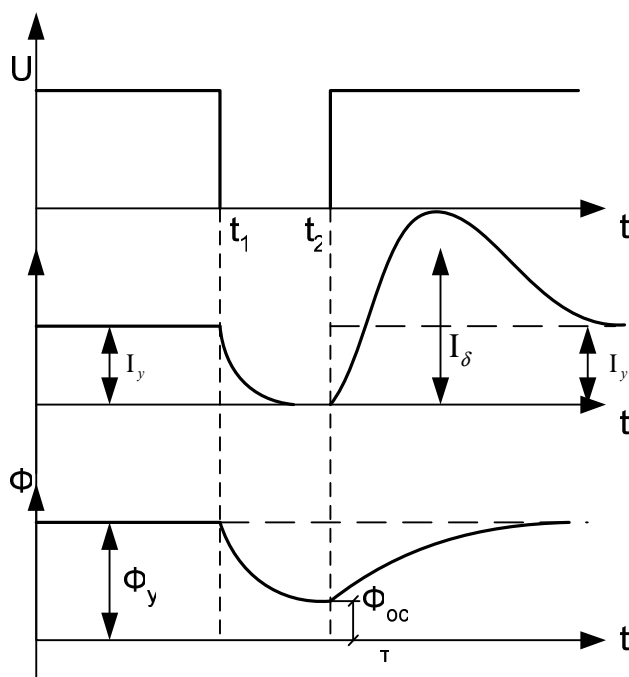


Рисунок 6.27 – Процессы в тяговом двигателе при снятии и восстановлении напряжения



$$I_6 = (2 \div 3)I_y.$$

В связи с этим бросок тока сопровождается нарушением коммутационного процесса. Нарушение коммутационного процесса вызвано еще и тем, что вихревые токи препятствуют нарастанию тока в дополнительных полюсах, а значит, нарушается баланс между реактивной и компенсационной ЭДС.

Итак, мы опять столкнулись с влиянием вихревых токов, только теперь уже при переходных процессах.

### 6.18 Влияние вихревых потоков в магнитопроводах на протекание переходных процессов

Существует утверждение, что изменение магнитодвижущей силы постепенно продвигает магнитный поток вглубь сечения магнитопровода (рис. 6.28), наводя ЭДС в условных контурах

$$e_{\text{вихр}} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Под действием этой ЭДС возникают токи

$$i'_{\text{вихр}} = e_{\text{вихр}} / r_{\text{вихр}}.$$

Вихревые токи, как бы образуют экран по внешнему контуру магнитопровода, препятствуя изменению потока по всей его площади (рис. 6.29).

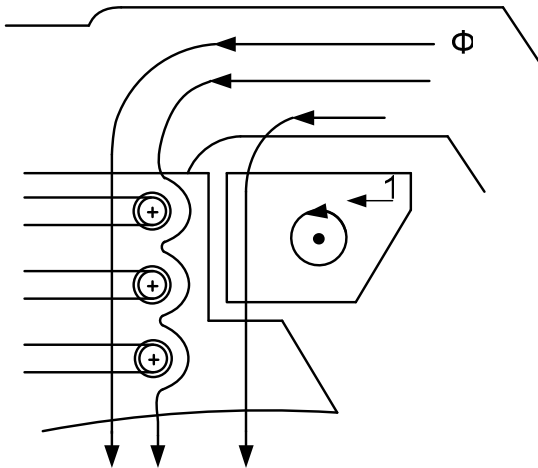


Рисунок 6.28 – Вихревые токи в магнитопроводе главных полюсов

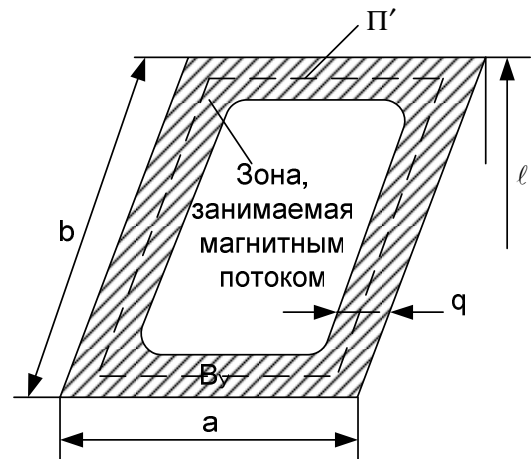


Рисунок 6.29 – Проникновение магнитного потока в магнитопровод:  $q$  – глубина проникновения потока;  $B_y$  – индукция в зоне проникновения потока;  $a$  – ширина магнитопровода;  $b$  – длина магнитопровода в осевом направлении;  $\Pi'$  – средний периметр сечения, занятого магнитным потоком

Средний периметр сечения

$$\Pi' = \kappa \Pi,$$

где  $\Pi = 2(a + b)$  – периметр сечения магнитопровода;  $a$  – величина;  $\kappa$  – коэффициент, зависящий от отношения потока  $\Phi$  в настоящий момент времени к установившемуся значению потока (рис. 6.30). При этом  $\Phi = B_y \kappa \Pi$ .

Сопротивление контура вихревого тока

$$r_{\text{вихр}} = \frac{\rho \cdot \kappa \Pi}{q \ell},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление магнитопровода, Ом·см;  $\ell$  – длина магнитопровода, см.

Глубина проникновения потока

$$q = \frac{\Phi}{B_y \cdot \kappa \Pi},$$

исходя из этого

$$r_{\text{вихр}} = \frac{\rho \cdot (\kappa \Pi)^2 \cdot B_y}{\ell \Phi}.$$

Изменение вихревого тока

$$i'_{\text{вихр}} = \frac{-\frac{d\Phi}{dt}}{r_{\text{вихр}}} = -\Phi \frac{d\Phi}{dt} \cdot \frac{\ell}{\rho (\kappa \Pi)^2 B_y}.$$

Это наиболее общая формула, характеризующая изменения вихревых токов в зависимости от остальных показателей.

При расчете конкретных участков магнитной цепи формула несколько модифицируется, в основном за счет добавления коэффициентов. Обозначив, постоянную часть приведенной формулы коэффициентом вихревых токов для данного магнитопровода  $K_{\text{вихр}}$ , перейдем к другой форме записи

$$i_{\text{вихр}} \approx K_{\text{вихр}} \Phi \frac{d\Phi}{dt}.$$

Из формулы видно, что вихревой ток прямо пропорционален изменению магнитного потока и чем больше  $\frac{d\Phi}{dt}$ , тем больше тормозящее действие вихревых токов.

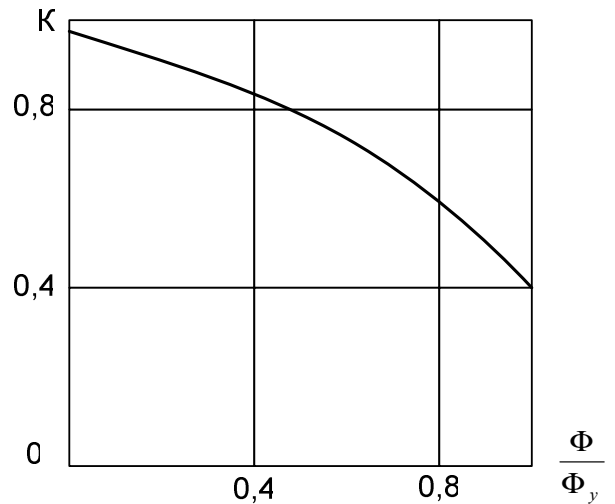


Рис. 6.30. Зависимость  $\kappa(\Phi / \Phi_y)$

На характер процессов, кроме вихревых токов, оказывают влияние как параметры двигателя, так и параметры внешней схемы. Вначале рассмотрим влияние индуктивности обмоток двигателя на характер переходных процессов. Почему именно индуктивности? Форма тока на активных сопротивлениях по существу не отличается от формы напряжения, а емкостные составляющие у двигателя невелики.

#### 6.19 Влияние индуктивности обмоток тяговых машин на переходные процессы

Если на время «отбросить» параметры внешней цепи, то с учетом влияния вихревых токов можно записать уравнение для двигательного режима машины

$$U_k = E + i r_d + (L - L_B) \frac{di}{dt} e_{св}, \quad (3)$$

где  $L = L_{я} + L_d + L_B + L_{ко}$  – индуктивность всех обмоток двигателя;  $e_{св}$  – ЭДС самоиндукции обмотки возбуждения

$$e_{св} = 2p\omega_B \sigma \frac{d\Phi}{dt}.$$

Индуктивность обмотки возбуждения очень велика и составляет примерно

$$L_B \approx (0,6 \div 0,7) L.$$

Теперь рассмотрим определение каждой составляющей формулы (3). Из уравнения (3) видно, что именно индуктивные составляющие будут влиять на характер протекания процессов в тяговом двигателе.

Полная индуктивность обмотки якоря

$$L_{я} = L'_{я} + L''_{я}$$

состоит из:  $L'_{я}$  – индуктивности, обусловленной потоком реакции якоря;  $L''_{я}$  – индуктивности, вызываемой местными (в якоре) потоками рассеяния.

Не проводя промежуточных преобразований для равномерного воздушного зазора можно записать

$$L'_{я} = 1,33 K_H \frac{N^2 \alpha^3 \ell_{я} D_{я}}{64 a^2 p^2 \delta K_B},$$

где  $K_B$  – коэффициент воздушного зазора;  $K_H$  – коэффициент для учета насыщенности магнитной цепи (определяется по графикам в зависимости от индукции в зубцовом слое).

Индуктивность обмотки якоря, обусловленная местными потоками

$$L_{\text{я}}'' = \frac{4\ell_{\text{я}}\lambda_{\text{п}}\omega_{\text{я}}^2}{Z},$$

где  $\lambda_{\text{п}}$  – проводимость рассеяния паза.

Индуктивность компенсационной обмотки определяется аналогично:

$$L_{\text{ко}} = \frac{2\omega_{\text{ко}}^2\ell_{\text{п}}\lambda'_{\text{ко}}}{pZ_{\text{ко}}},$$

где  $\lambda'_{\text{ко}}$  – проводимость рассеяния, состоящая из рассеяния в пазах, по сторонам зубцов и в лобовых частях обмотки.

Индуктивность обмотки главных полюсов

$$L_{\text{в}} = 2p\omega_{\text{в}}\sigma \frac{d\Phi}{di_{\mu}},$$

где  $i_{\mu}$  – ток намагничивания

$$i_{\mu} = i_{\text{в}} - i_{\text{вихр}} / \omega_{\text{в}}.$$

Индуктивность обмотки добавочных полюсов

$$L_{\text{д}} = \frac{1,3\sigma_{\text{д}}p\Phi_{\text{к}} \cdot \omega_{\text{д}}}{i_{\text{я}}},$$

где 1,3 – коэффициент, учитывающий распределение потока рассеяния по высоте;  $\sigma_{\text{д}}$  – коэффициент рассеяния дополнительного полюса.

Таким образом, определены факторы, влияющие на характер переходных процессов в двигателе.

## 6.20 Влияние параметров внешних цепей на переходные процессы

Рассмотрим широко применяемую схему подключения тяговых двигателей на подвижном составе (рис. 6.31).

Назначение всех элементов схемы хорошо известно. Подробная схема (только с одним двигателем) уже рассматривалась. Сложность расчета связана с тем, что полученная схема нелинейная из-за сглаживающего реактора, индуктивного шунта и обмоток двигателя.


$$\left\{ \begin{array}{l} (L_{\text{Я}} + L_{\text{p}}) \frac{di_{\text{Я}}}{dt} R_{\text{Я}} i_{\text{Я}} + r_{\text{ш1}} i_{\text{ш1}} + C \Phi n = U \\ L_{\text{ш}} \frac{di_{\text{ш2}}}{dt} + r_{\text{ш2}} i_{\text{ш2}} - i_{\text{ш1}} r_{\text{ш1}} = 0 \\ L_{\text{Б}} \frac{di}{dt} + r_{\text{Б}} i_{\text{Б}} - r_{\text{ш1}} i_{\text{ш1}} = 0 \\ i_{\text{Я}} = i_{\text{Б}} + i_{\text{ш1}} + i_{\text{ш2}} \end{array} \right.,$$
$$R_{\text{я}} = r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{ко}} + 0,5r_{\text{р}} + r_{\text{тр}},$$

По приведенным уравнениям можно сделать следующие замечания. Считается, что индуктивности зависят от токов, но при быстроизменяющихся процессах индуктивное сопротивление не успевает изменяться, поэтому в уравнения можно подставлять значения индуктивного сопротивления, которые были

при установившихся значениях тока. Для учета влияния вихревых токов в эти уравнения можно включить и значение тока намагничивания

$$i_{\mu} = i_B - i_{\text{вихр}} / \omega_B = i_B - K_{\text{вихр}} \Phi \frac{d\Phi}{dt} / \omega_B ;$$

$$i_{\mu} = i_a - \gamma \Phi \frac{d\Phi}{dt} ,$$

тогда

$$\left\{ \begin{array}{l} (L_{\text{я}} + L_p) \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + r_{\text{ш1}} i_{\text{ш1}} + C \Phi n = U \\ L_{\text{ш}} \frac{di_{\text{ш2}}}{dt} + r_{\text{ш2}} i_{\text{ш2}} - i_{\text{ш1}} r_{\text{ш1}} = 0 \\ L_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B - r_{\text{ш1}} i_{\text{ш1}} = 0 \\ i_{\text{я}} = i_B + i_{\text{ш1}} + i_{\text{ш2}} \\ i_{\mu} = i_B - \gamma \Phi \frac{d\Phi}{dt} \end{array} \right. ,$$

где  $\Phi = f(i_{\mu})$  – нагрузочная характеристика.

Полученная система уравнений полностью описывает переходные процессы в цепи тягового двигателя. Решается она на ЭВМ методами интегрирования дифференциальных уравнений.

## 6.21 Мероприятия, направленные на облегчение протекания переходных процессов

Расчеты переходных процессов дают возможность выбрать параметры силовой цепи электровоза таким образом, чтобы обеспечить надежную работу двигателя и электровоза в целом.

Поэтому, задаваясь значениями бросков токов, можно оценить максимально допустимые значения индуктивностей шунта и сглаживающего реактора. Это позволяет уменьшить металлоемкость оборудования и одновременно снизить потери.

Важен правильный выбор номинальности коэффициента возбуждения  $\beta_{\text{ном}}$ . Этот параметр существенно влияет на переходные процессы, в частности на амплитуду броска тока.

Снижение влияния вихревых токов можно достичь, используя следующие мероприятия:

- 1) шихтовку элементов магнитной цепи дополнительных полюсов;
- 2) образование второго зазора под дополнительными полюсами.

Выполняя второй зазор, следует не забывать о том, что это приведет к падению напряженности и необходимо будет увеличивать МДС за счет увеличения числа витков.

## 7 НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

### 7.1 Допустимые превышения температур

При работе электрической машины часть ее энергии превращается в тепло. Это тепло выделяется в обмотках в виде электрических потерь и в виде потерь на перемагничивание стали. Кроме этого, нагреваются от трения подшипники и коллектор. Нагрев электрической машины вызывает старение изоляции, а вызванное нагреванием обмоток и неодинаковые коэффициенты линейного расширения у различных частей тягового двигателя могут привести к разрыву изоляции, а значит и к преждевременному выходу машины из строя.

В связи с этим вполне естественно предположить, что на интенсивности старения изоляции будут сказываться следующие факторы:

- 1) значение и время действия рабочих температур;
- 2) пределы и частота изменения температур;
- 3) влажность;
- 4) электрическое напряжение;
- 5) воздействие химических элементов;
- 6) вибрационные нагрузки.

В настоящем подразделе будут рассматриваться первые два пункта из перечисленных.

В зависимости от нагревостойкости компонентов, входящих в состав изоляции ее подразделяют на 5 классов А, В, Е, F, Н. В тяговом электромагнитостроении используют три класса В, F, Н.

Предельные температуры нагревания для этих классов изоляции мы указывали в одном из первых разделов. Хотелось бы заметить, что расчетный срок службы изоляции класса В составляет 4...5 лет, а изоляции класса Н – 8...10 лет.

Допустимые превышения температур нормируются для каждой части тягового двигателя (обмотки якоря, обмотки полюсов, коллектора).

Таблица 7.1

## Допустимые превышения температур

Класс нагревостойкости	Допустимая температура нагрева, °С		
	Обмотка якоря	Обмотка полюсов	Коллектор
В	120	130	95
F	140	155	95
H	160	180	105

Различаются изоляционные материалы для разных классов. Для класса В – это материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна. Класс F – то же самое, но пропитывается синтетическими связующими и эпоксидными смолами. Класс H – то же самое, но пропитываются кремнийорганическим составом.

## 7.2 Классическая теория нагревания однородного твердого тела

Согласно этой теории части машины рассматриваются как однородные тела, выделяющие тепловую энергию. Часть этой энергии вызывает нагревание тела, а часть рассеивается в окружающую среду.

Для лучшего понимания процессов сделаем небольшой экскурс в теплотехнику и определим ряд ее аспектов и терминов. Итак, общая теплоемкость тела – количество тепла, необходимое для его нагревания на 1 °С. Общая теплоемкость зависит от массы тела  $m$  и удельной теплоемкости  $C$

$$C = cm.$$

Общая теплоотдача тела  $B$  – количество тепловой энергии, отдаваемой за единицу времени со всей поверхности в окружающую среду при разности температур в 1 °С

$$B = \alpha S,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи Вт/см<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поверхности тела.

Коэффициент теплоотдачи – количество тепловой энергии, отдаваемой лучеиспусканием и конвекцией за единицу времени с единицы поверхности тела при разности температур в 1 °С.

Представим, что в начале испытания температура тела равна температуре окружающей среды, тогда за начальную единицу времени выделится тепловая энергия  $\Delta P$ . За какое-то время  $dt$  выделится энергия  $\Delta P dt$ . Причем она будет делиться на две составляющие:

Часть её пойдет на нагревание тела  $\Delta P_c dt$ , а другая на рассеивание в окружающую среду.



Если за время  $dt$  температура тела повысилась на  $d\tau$ , то на это затрачена тепловая энергия

$$\Delta P_c dt = C d\tau.$$

Так как тепловая энергия частью поглощается телом, а частью рассеивается, то можно записать уравнение теплового баланса

$$\Delta P dt = C d\tau + B \tau dt.$$

Хотелось бы сразу пояснить два момента.

Во-первых, если в начале нагревания температура тела равна температуре окружающей среды, т. е.  $\tau = 0$ , то

$$\Delta P dt = C d\tau.$$

Вся выделившаяся энергия будет затрачиваться на нагревание тела. И наоборот, если  $\Delta P$  величина постоянная, то через некоторое время тело настолько нагреется, что вся выделившаяся энергия будет рассеиваться в окружающую среду, то есть  $\tau_\infty = \text{const}$ , тогда  $d\tau = 0$  и

$$\Delta P dt = B \tau_\infty dt.$$

Отсюда, установившееся превышение температуры тела

$$\tau_\infty = \frac{\Delta P}{\alpha S} = \frac{\Delta P}{B}.$$

Учитывая, что выделившийся в теле тепловой поток

$$\Delta P = \tau_\infty B,$$

запишем

$$\tau_\infty B dt = C d\tau + B \tau dt.$$

Разделив правую и левую часть на  $B$  и обозначив  $\frac{C}{B} = T$ , получим

$$\tau_\infty dt = T d\tau + \tau dt,$$

где  $T$  – постоянная времени нагревания, т. е. это время, за которое превышение температуры рассматриваемого тела над температурой окружающей среды достигнет  $\tau_\infty$  при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду.

Разделив переменные, получим

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\tau}{\tau_\infty - \tau},$$

интегрируя, получим

$$\frac{t}{T} = -\ln(\tau_\infty - \tau) + N,$$

где  $N$  – постоянная интегрирования.

При  $t = 0$

$$N = \ln(\tau_{\infty} - \tau_0),$$

тогда

$$\frac{t}{T} = -\ln(\tau_{\infty} - \tau) + \ln(\tau_{\infty} - \tau_0)$$

или

$$-\frac{t}{T} = \ln[(\tau_{\infty} - \tau)/(\tau_{\infty} - \tau_0)].$$

Определим из полученного выражения, превышение температуры тела над температурой окружающей среды в функции времени

$$\exp(-t/T) = \frac{(\tau_{\infty} - \tau)}{\tau_{\infty} - \tau_0};$$

$$\tau_{\infty} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) - \tau_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) = \tau_{\infty} - \tau;$$

$$\tau = \tau_{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right)\right] + \tau_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (4)$$

Если начальное превышение температуры тела  $\tau_0 = 0$ , тогда

$$\tau = \tau_{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right)\right].$$

Исходя из этого кривые нагрева и охлаждения однородного тела будут иметь вид, показанный на рисунке 7.1.

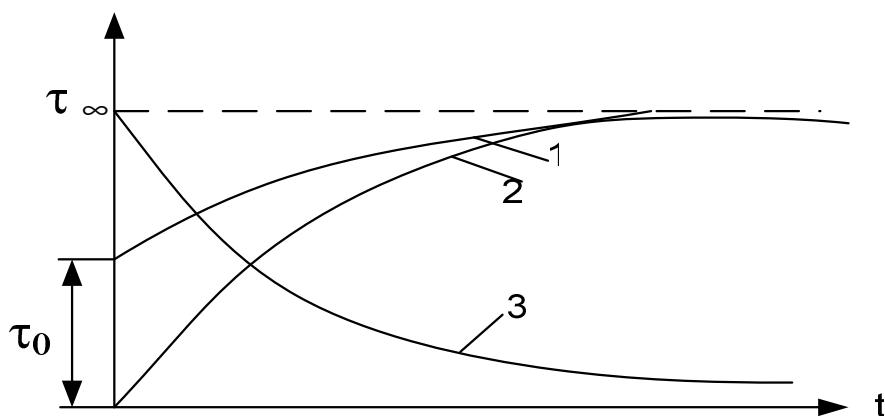


Рисунок 7.1 – Кривые нагрева и охлаждения однородного тела:  
1, 2 – кривые намагничивания; 3 – кривая охлаждения

Учитывая что  $\tau_{\infty} = \frac{\Delta P}{B}$  можно сказать, что, если тепловыделение прекратилось, т. е.  $\Delta P = 0$ , то уравнение приобретает вид

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right).$$

Этому уравнению соответствует на рисунке 7.1 кривая (3) охлаждения тела. Это наиболее общее уравнение, характеризующее нагревание тела. Теперь рассмотрим процесс нагревания, для примера, одной из обмоток. Остальные обмотки рассчитывают аналогично.

### 7.3 Расчет нагревания обмотки якоря

Ранее упоминалось, что температура и процесс нагревания будет зависеть от выделившейся энергии. Кроме того, было оговорено, что в основном электрические потери, это потери на нагрев. Итак, тепловой поток, выделившейся из обмотки якоря,

$$\Delta P_{\text{мя}} = I_{\infty}^2 r_{\text{я}} K_{\text{рм}} + \Delta P_{\infty \text{ком}} + \Delta P_{\infty \text{паз}},$$

где  $\Delta P_{\infty \text{ком}}$ ,  $\Delta P_{\infty \text{паз}}$  – мощности потерь в меди обмотки якоря, соответственно коммутационные и от главного парового поля;  $K_{\text{рм}}$  – коэффициент увеличения сопротивления меди при ожидаемой температуре  $t_n$ , по отношению к сопротивлению при 20 °С

$$K_{\text{рм}} = 1 + 0,004(t_n - 20^\circ).$$

Для расчета нагревания обмоток удобно использовать тепловые схемы замещения, которые аналогичны схемам электрических цепей.

Прежде чем составлять схему, для наглядности изобразим выделение тепла в обмотке (рис. 7.2).

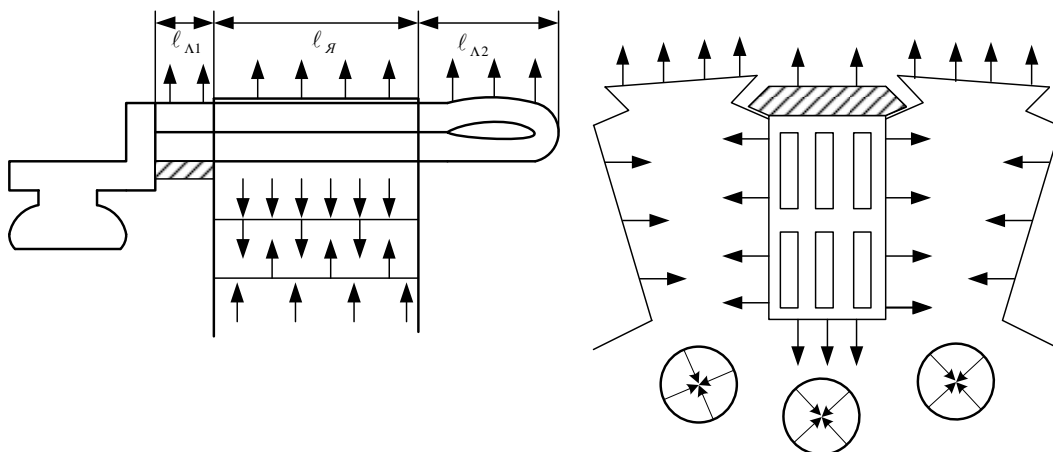


Рисунок 7.2 – Схемы тепловых потоков обмотки якоря

Причем в эквивалентных схемах сопротивление распространению теплового потока заменяется электрическим сопротивлением.

Так, термическое сопротивление распространению потока с лобовых частей

$$R_{ТЛ} = \frac{1}{\alpha S_{Л}} + \frac{b_{Л}}{\lambda S_{Л}},$$

где  $b_{Л}$  – эквивалентная толщина изоляции лобовых частей;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Внешняя поверхность лобовых частей определяется как

$$S_{Л} = \pi D_{я}(\ell_{Л1} + \ell_{Л2}).$$

С учетом того, что якорь нагревается не только от нагрева проводов, но и от перемагничивания стали, возможная схема замещения показана на рисунке 7.3.

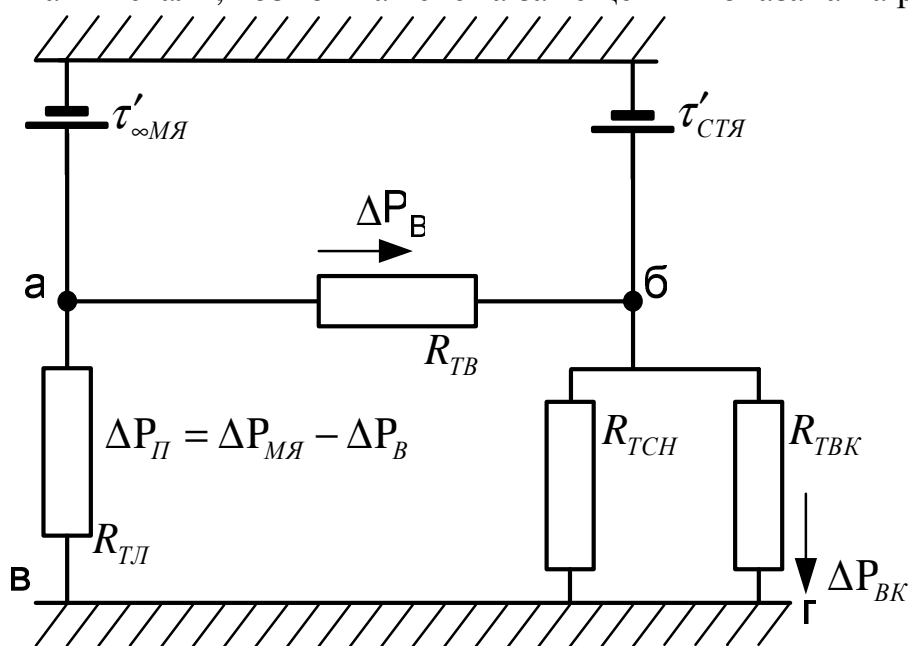


Рисунок 7.3 – Схема замещения тепловых потоков обмотки якоря

Для более точных расчетов при определении сопротивления тепловому потоку якоря вводят толщину изоляции якоря. В данном случае пренебрегаем этим. Кроме теплового потока от обмотки в вентиляционные каналы, выходит и тепловой поток от нагрева стали. Термическое сопротивление тепловому потоку  $R_{ТСН}$ , рассеиваемому с поверхности сердечника якоря

$$R_{ТСН} = \frac{1}{\underbrace{\alpha \pi D_{я} \ell_{я}}_{S_{я}}},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $S_{я}$  – поверхность якоря;  $R_{ТВК}$  – термическое сопротивление тепловому потоку в вентиляционных каналах

$$R_{\text{ТВК}} = \frac{1}{\alpha_K N_K \pi d_K \ell_{\text{я}}} = \frac{1}{\alpha S_K N_K},$$

где  $\Delta P_B$  – тепловой поток между точками а и б. Два параллельных сопротивления могут быть заменены одним

$$R_{\text{ТС}} = \frac{R_{\text{ТСН}} \cdot R_{\text{ТВК}}}{R_{\text{ТСН}} + R_{\text{ТВК}}}.$$

Установившееся превышение температуры меди обмотки якоря над температурой вентиляционного воздуха

$$\tau'_{\infty \text{МЯ}} = R_{\text{ТЛ}} (\Delta P_{\text{МЯ}} - \Delta P_B).$$

Чтобы определить  $\Delta P_B$ , рассмотрим контур а – в – г

$$R_{\text{ТЛ}} (\Delta P_{\text{МЯ}} - \Delta P_B) = R_{\text{ТВ}} \Delta P_B + R_{\text{ТС}} (\Delta P_{\text{СТ}} + \Delta P_B);$$

$$\Delta P_B = \frac{R_{\text{ТЛ}} \Delta P_{\text{МЯ}} - R_{\text{ТС}} \Delta P_{\text{СТ}}}{R_{\text{ТЛ}} + R_{\text{ТС}} + R_{\text{ТВ}}}.$$

Превышение температуры меди обмотки якоря над температурой наружного воздуха

$$\tau_{\infty \text{МЯ}} = \tau'_{\infty \text{МЯ}} + \frac{\tau_B}{2},$$

где  $\tau_B$  – перегрев вентиляционного воздуха относительно температуры окружающей среды.

Аналогично составляются тепловые схемы для других обмоток и деталей тягового двигателя. Мы рассмотрели процесс нагревания однородного тела. В заключение необходимо сделать несколько замечаний. В действительности разные части одного и того же тела нагреваются неодинаково. Это зависит и от условий отвода тепла и оттого, с какой стороны подается охлаждающий воздух.

Методы расчета распределения тепла вдоль тела есть, но они не очень точны и сложны, поэтому в настоящем курсе они рассматриваться не будут. Раз обмотки и в целом двигатель нагреваются, то естественно, для реализации больших мощностей необходимо отводить тепло, а это значит нужно создавать систему вентиляции.

## 7.4 Вентиляция тяговых двигателей

Все потери в двигателе в конечном счете превращаются в тепло, которое необходимо отводить от частей машины, чтобы не вызвать перегрева и тех явлений о которых упоминалось выше. В настоящее время для тяговых двигателей используют воздушное охлаждение.

Для тяговых электрических машин установленных на ЭПС используют различные способы вентиляции, которые можно классифицировать по нескольким признакам.

В зависимости от места установки вентиляторов и способов их вращения различают системы:

- 1) независимой вентиляции;
- 2) самовентиляции;
- 3) смешанной вентиляции.

При независимой вентиляции, вентилятор устанавливается вне вентилируемой машины и приводится во вращение специальным двигателем. Как правило, это машина переменного тока мощностью 30...100 кВт.

При самовентиляции вентилятор устанавливается на якоре вентилируемой машины и является элементом ее конструкции. Система смешанной вентиляции предполагает совместное использование обоих способов. Применяется она чрезвычайно редко.

Прежде чем рассматривать подробности каждого вида вентиляции хотелось бы несколько слов сказать о том, как выбирается каждый вид.

Принято считать, что независимую вентиляцию удобно использовать на электровозах, а самовентиляцию на электропоездах. Это обусловливается режимами их работы. Электровоз на крутых затяжных подъемах реализует большие токи с низкой частотой вращения якоря тягового двигателя. При этом частота вращения в 1,8...2 раза ниже номинальной. В связи с этим установленный на валу вентилятор был бы не эффективен. У моторвагонного подвижного состава режимы работы резко отличаются от электровозных и характеризуются, во-первых, большей скоростью, во-вторых, частыми интенсивными разгонами, а затем длительным движением на выбеге. В этом случае вентилятор, установленный на валу, продолжает вращаться, интенсивно охлаждая двигатель. Хотелось бы отметить, что машины мощностью до 250 кВт всегда выполняют с самовентиляцией.

## 7.5 Самовентилирующиеся машины

У самовентилирующихся машин различают два типа вентиляции:

- 1) вытяжную;
- 2) нагнетательную.

При вытяжной вентиляции вентилятор устанавливается со стороны, обратной коллектору, и воздух засасывается через сетку или фильтр в околосборное пространство, а далее протекает между полосами, по каналам якоря и выходит с противоположной стороны.

При нагнетательной вентиляции воздух засасывается со стороны передачи и затем продувается сквозь двигатель. Достоинство – меньше шума. Несколько слов необходимо сказать о конструкции вентиляторов.

Якорные вентиляторы выполняют практически всегда с прямыми радиальными лопатками. Это объясняется тем, что тяговые двигатели эксплуатации реверсируют, а подача воздуха должна оставаться постоянной. У вспомогательных машин применяют наряду с прямыми лопатками и изогнутые. По конструкции венца различают вентиляторы:

- 1) с открытыми радиальными лопатками;
- 2) воздухо-направляющими кольцами;
- 3) двухкамерные литые вентиляторы с консольными лопатками;
- 4) двухкамерные сварные вентиляторы с центральным несущим диском;
- 5) литые вентиляторы с удлиненными лопатками.

На рисунке 7.4 приведены вентиляторы двух видов (первого и последнего).

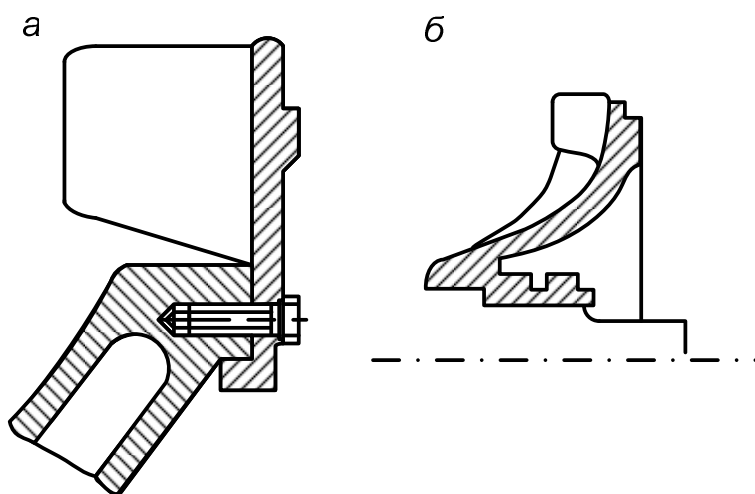


Рисунок 7.4 – Конструкция якорных вентиляторов:  
*а* – с открытыми радиальными лопатками; *б* – с удлиненными лопатками

Все модификации вентиляторов направлены на улучшение аэродинамических свойств и на усиление конструкции. В этом плане хорошими показателями отличается последняя конструкция. Общее число лопаток вентиляторов от 11 до 25 шт.

## 7.6 Независимая вентиляция

Наиболее подробно остановимся на этом типе вентиляции. Поскольку он применяется практически на всех современных тепловозах и электровозах. При независимой вентиляции воздух забирается из атмосферы и нагнетается по воздухопроводам в тяговую машину, поэтому при независимой вентиляции используют исключительно нагнетательную вентиляцию. По числу тяговых двигателей обслуживаемых одним вентилятором различают:

- 1) групповую систему независимой вентиляции;
- 2) индивидуальную систему независимой вентиляции.

Для равномерного распределения объема охлаждающего воздуха используют специальные заслонки, выравнивающие ими сопротивление воздухопроводов. При индивидуальной системе вентиляции каждый двигатель обдувается своим вентилятором, а при групповой – на несколько двигателей один вентилятор.

Наиболее широкое распространение на ЭПС получила система разомкнутого цикла вентиляции. В этой системе воздух после тягового двигателя выбрасывается в атмосферу. Существует система полузамкнутой вентиляции, при которой часть воздуха используется неоднократно. Это помогает сохранить изоляцию защищая её от пыли, влаги и засоленности. Схема полузамкнутой вентиляции изображена на рисунке 7.5.

В разомкнутом цикле нет перемешивания свежего воздуха с прошедшим через двигатель, но в остальном все так же.

Как видно из рисунка воздух поступает со стороны коллекторной камеры. Это сделано по следующим причинам:

- 1) удобнее подключать воздухопровод;
- 2) обеспечивается прохождение относительно большого количества воздуха внутри якоря;
- 3) достигается более низкая температура петушков коллектора и его поверхности;
- 4) обеспечивается более интенсивное дутье в камере коллектора, благодаря чему исключается скопление ионизированного воздуха и облегчается коммутация тягового двигателя.

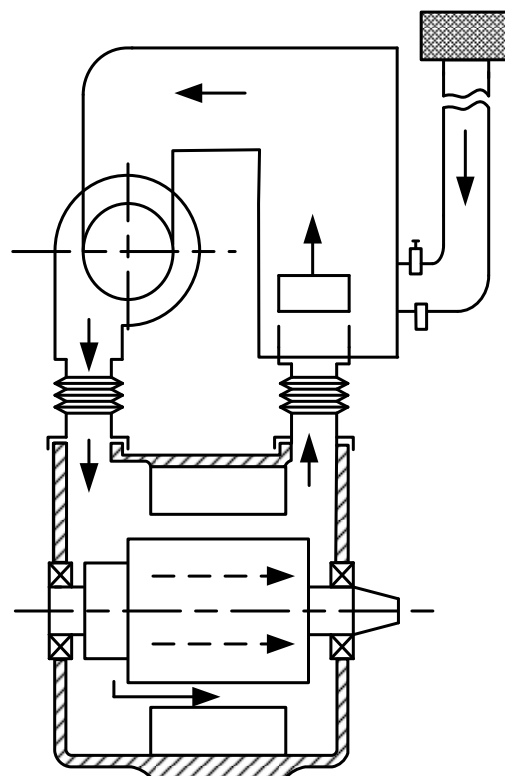


Рисунок 7.5 – Системы полузамкнутой независимой вентиляции

## 7.7 Расчет вентиляции тяговых электрических машин

Поскольку машины в основном (за исключением подшипников) охлаждаются пропускаемым через них воздухом, то эффективность вентиляции будет зависеть от объема охлаждающего воздуха. При этом все выделившееся тепло отдается этому воздуху. С учетом изложенного

$$\Sigma' \Delta P_{\infty} t = g \tau_b Q,$$

где  $\Sigma' \Delta P_{\infty}$  – потери мощности при продолжительном режиме без потерь в подшипниках, кВт;  $t$  – время, за которое рассматривается тепловой баланс, с;  $g$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau_b$  – температура подогрева воздуха в машине, °С;  $Q$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $c$  – удельная теплоемкость воздуха,  $c = 1 \text{ кВт} \cdot \text{с} / (\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ .



Обычно считается (с учетом всех коэффициентов), что объемный расход воздуха при независимой вентиляции

$$Q = (0,041 \dots 0,036) \Sigma' \Delta P_{\infty}.$$

Как показано на рисунке 7.5, поток воздуха разветвляется на две составляющие (по каналам якоря и между полюсов). Отношение этих потоков оценивается коэффициентом

$$K_B = \frac{Q_{\text{я}}}{Q_{\text{к}}},$$

тогда можно записать

$$Q_{\text{я}} = Q - Q_{\text{к}}.$$

Считается, что скорость воздуха должна быть 10...12 м/с.

Тогда статический напор воздуха при входе его в машину будет определяться аэродинамическим сопротивлением каналов протекания воздуха в машине и общим объемом протекающего по машине воздуха

$$H_{\text{ст}} = ZQ^2.$$

Аэродинамическое сопротивление машины определяется по аналогии с электрическим сопротивлением как сумма сопротивлений протеканию воздуха по отдельным участкам воздухопроводов машины.

Сопротивления участков  $Z_i$  зависят от потерь напора на этом участке, сечения участка и плотности воздуха. В целом, за исключением сечения участка, все показатели зависят от формы участка и гладкости его поверхностей.

В заключение хотелось бы остановиться на перспективах вентиляции и общепромышленных способах вентиляции электрических машин. В крупных электрических машинах применяют замкнутую водородную вентиляцию. Водород имеет в 7,1 раза большую теплопроводность и в 1,3 раза больший коэффициент теплоотдачи. Это позволяет уменьшить нагрев, а значит потери, в том числе вентиляционные приблизительно в 10 раз.

Дальнейшее совершенствование систем вентиляции связано с выполнением полых проводников и охлаждением их водородом или водой.

Промышленные машины уникальной мощности охлаждаются гелием совместно с водородом или азотом. Так называемое криогенное охлаждение. Конечно, в существующих двигателях вряд ли могут быть использованы эти методы. Но для перспективного подвижного состава с линейными двигателями обычные воздушные системы не пригодны, и на них будут использованы все указанные способы, вплоть до криогенного охлаждения.

## 8 ТЯГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Необходимость в частом изменении скорости движения ЭПС. требует использования в качестве электрического привода двигателей с высокой перегрузочной способностью, обладающих хорошими регулировочными свойствами. Этим требованиям отвечают двигатели постоянного тока. Однако, как уже отмечалось, в настоящее время промышленность подошла к предельным мощностям по условиям коммутации электромеханическим коммутатором, называемым – коллектором. Такой узел даже на тех мощностях, которые существуют, требует повышенного внимания, ухода, осмотра и т. д.

В основном в связи со сказанным, да и по ряду других причин, разработчики обратились к использованию в качестве тягового электродвигателя электрической машины переменного тока, а именно к синхронным (вентильным) и асинхронным двигателям. Первые образцы ЭПС с асинхронными тяговыми двигателями созданы в 1970–1972 гг. и использовались, как правило, в научных целях. Первые серийные электровозы были выпущены в 1975–1980 гг.

Почему же так слабо идет (или шло) развитие этого перспективного вида привода? Основное достоинство двигателей вентильных и асинхронных – это отсутствие коллектора. Но тогда, чтобы переключать (коммутировать) большие токи с фазы на фазу, потребовался внешний электронный коммутатор, а промышленность ими не располагала и лишь в последнее время с развитием полупроводниковой техники и созданием мощных, надежных тиристоров эти работы обрели техническую базу.

Каковы же основные достоинства машин переменного тока:

- 1) отсутствие электромеханического коммутатора;
- 2) высокая надежность из-за отсутствия коллектора и уменьшения в силовых цепях контактно-релейной аппаратуры;
- 3) улучшение тяговых свойств электровоза, благодаря жесткой характеристике электрической машины. Это уменьшает склонность к боксованию;
- 4) резкое сокращение расхода меди при производстве тяговых двигателей. Позже, при ознакомлении с конструкцией асинхронного тягового двигателя, будет детально рассмотрено, за счет чего добиваются этого сокращения (если в двух словах – за счет исключения якорной обмотки в том смысле, в котором мы это понимаем). При одинаковом моменте и частоте, объем меди сокращается в 2...3 раза;
- 5) существенное уменьшение массы и габаритов тяговых двигателей;
- 6) автоматизация процессов управления режимами работы двигателей переменного тока.

Эти преимущества и привлекают создателей ЭПС. Рассмотрим теорию работы и конструкцию вентильных и асинхронных тяговых двигателей.

## 9 ВЕНТИЛЬНЫЕ ТЯГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Электромагнитная система вентильного тягового двигателя подобна синхронной машине. На статоре расположена равномерно распределенная якорная обмотка и на роторе (вращающейся части) обмотка возбуждения постоянного тока, питаемая через специальные контактные кольца и щетки. По принципу действия вентильный двигатель подобен машине постоянного тока, в которой электромеханический коллектор заменен системой управляемых вентилей. Рассмотрим работу такой системы от общего к частному. Принципиальная схема электропривода с тяговыми вентильными двигателями показана на рисунке 9.1.

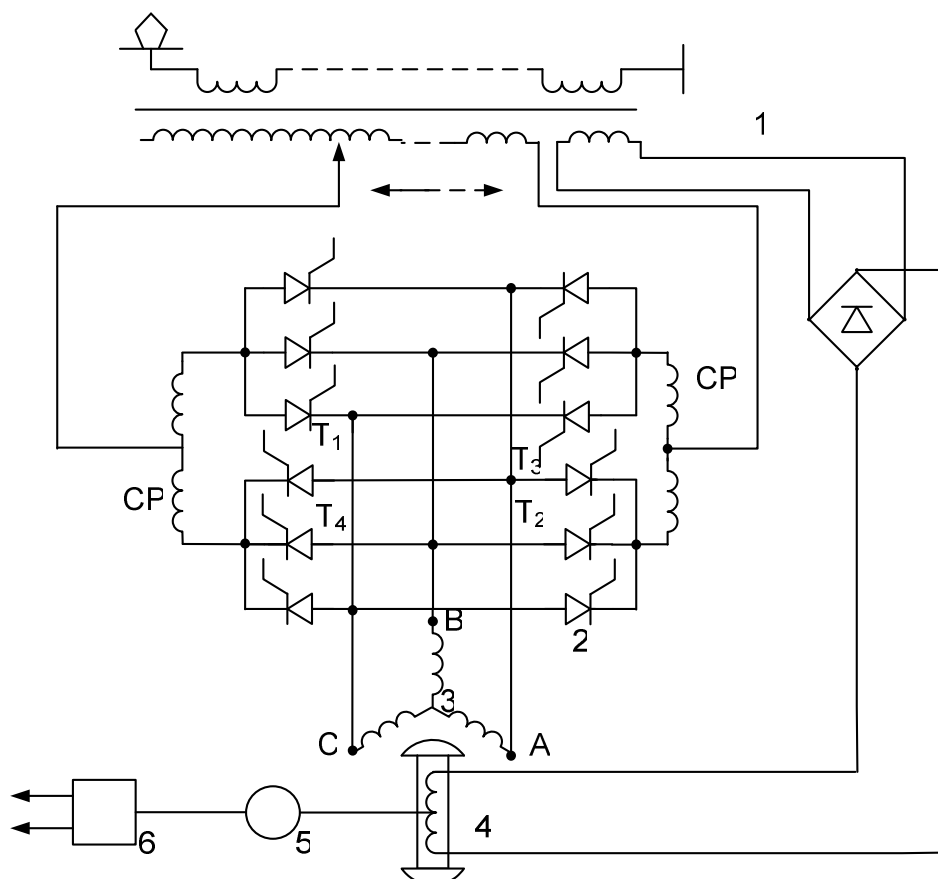


Рисунок 9.1 – Принципиальная схема электропривода с тяговыми вентильными двигателями:

CP – сглаживающий реактор; 1 – трансформатор; 2 – тиристорный коммутатор;

3 – статорная обмотка; 4 – роторная обмотка; 5 – измеритель положения ротора;

6 – устройство управления тиристорами

Так как по обмоткам якоря необходимо пропускать постоянный ток, применяют два тиристорных коммутатора. Допустим, необходимо пропустить постоянный ток по фазе C и B, тогда в первый полупериод будут работать тиристоры T1 и T2, во второй T3 и T4. Обмотка возбуждения получает питание через мостовую схему выпрямления. Определено, что необходимо пропускать ток по соответствующим ветвям якорной обмотки. Это утверждение – первый шаг к обоснованию принципа работы вентильного двигателя. Для простоты рассмот-

рим работу вентильного двигателя с использованием лишь одного тиристорного коммутатора, считая, что ток уже выпрямлен (рис. 9.2).

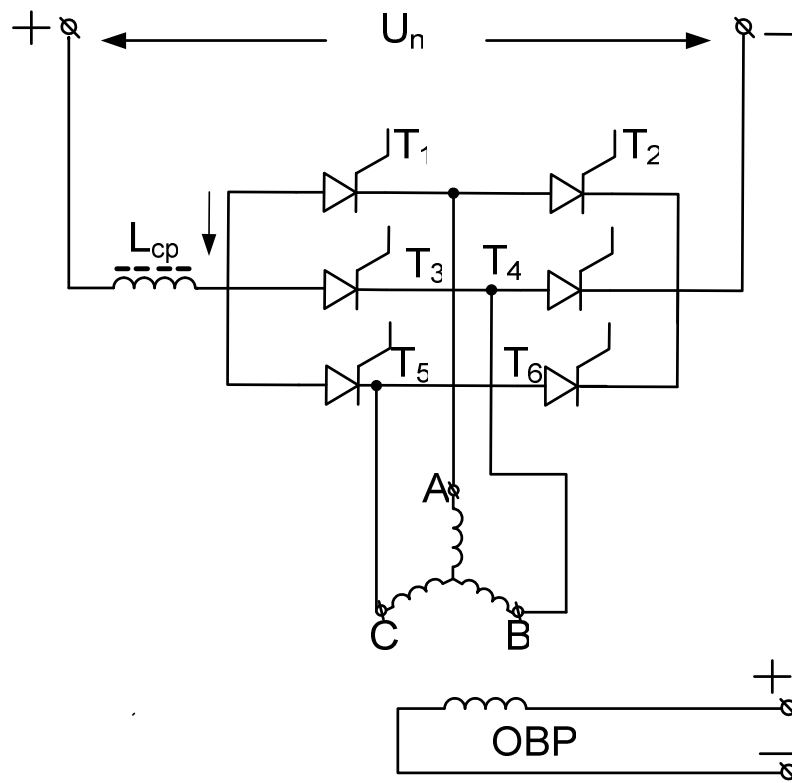


Рисунок 9.2 – Схема вентильного двигателя с явно выраженным звеном постоянного тока

Допустим, ток протекал вначале по обмоткам А и В в направлении от А к В. Чтобы детально рассмотреть принцип работы коммутатора и образования вращающего момента, необходимо одновременно рисовать два рисунка, одним поясняя первый аспект, вторым иллюстрируя диаграмму замыкания тиристоров (рис. 9.3).

Взаимодействуя между собой магнитный поток статора  $\Phi_c$  и ротора  $\Phi_r$ , который направлен, как показано на рисунке образуют вращающий момент в соответствии с обычным правилом, как для двигателей постоянного тока (вытеснение проводника с током из магнитного поля). Вращающий момент направлен по стрелке. Для обеспечения протекания тока должны быть замкнуты тиристоры T1 и T4.








Обозначение вентеля	Угол поворота ротора, град.				
	60	120	180	240	300
T1					
T3					
T5					
T2					
T4					
T6					

Рисунок 9.3 – Диаграмма замыкания тиристоров

Предположим, что ток протекает по фазам А и В в направлении от А к В.

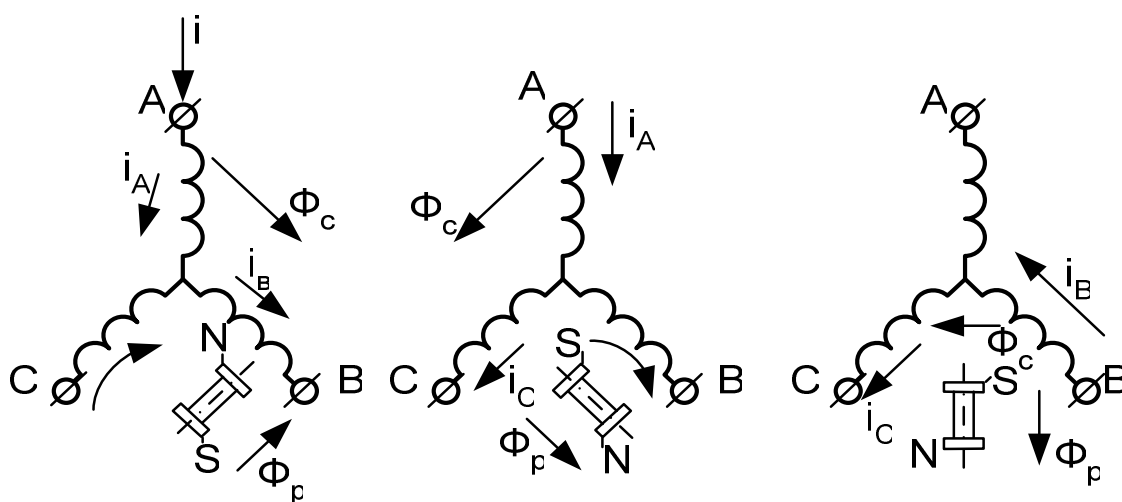


Рисунок 9.4 – Принцип получения вращающегося поля

Если после поворота ротора на определенный угол ( $\approx 30^\circ$ ) переключить ток с фазы В на фазу С, то  $\Phi_c$  повернется на  $60^\circ$  и соответственно на такой же угол повернется ротор двигателя. При этом замкнутся тиристоры Т1 и Т6. После поворота на  $60^\circ$  фаза А отключается от сети, и ток начинает протекать по фазе В и С. Далее процесс продолжается аналогично. Для обеспечения дальнейшего вращения переключается ток с фазы С на фазу А, и ток протекает по тиристорам Т3 и Т2.

При указанном способе формирования магнитодвижущей силы МДС идеализированная форма токов (допустим для фазы А будет иметь вид, показанный на рис. 9.6).

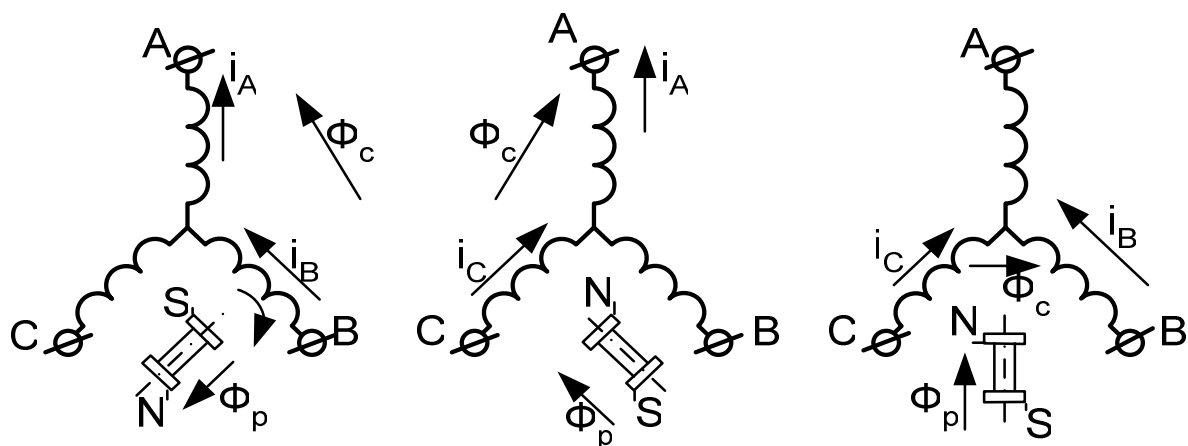


Рисунок 9.5 – Принцип получения вращающегося поля (продолжение)

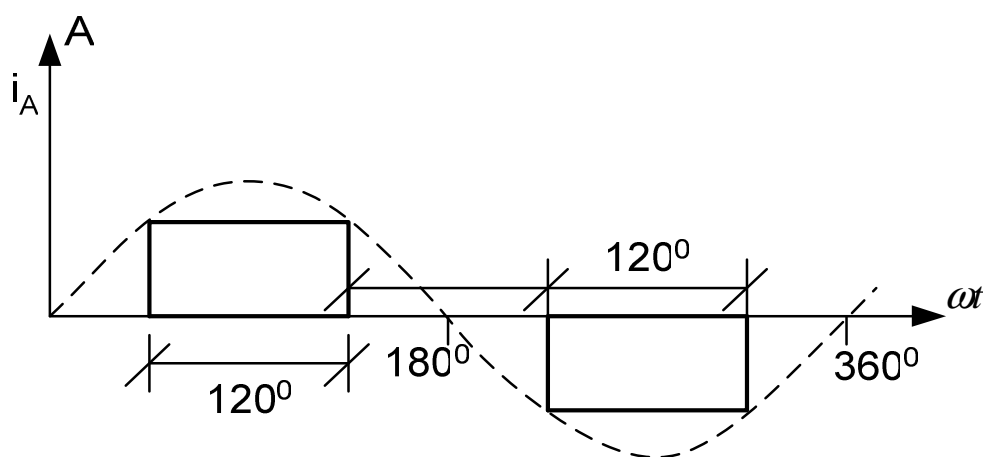


Рисунок 9.6 – Идеализированная форма фазного тока

Пользуясь таблицей замыкания тиристоров, можно составить такую же диаграмму для всех токов. Для идеального случая такая диаграмма составляться не будет. Достаточно для одной фазы. А для реального распределения токов диаграмма представлена ниже. Но с начало, несколько слов о наводимой в обмотках ЭДС. В обмотках наводится две ЭДС от двух источников:

1) ЭДС от тока, протекающего по обмоткам статора  $e_{BA}$ ,  $e_{CA}$ ,  $e_{CB}$ ,  $e_{AB}$ ,  $e_{AC}$ ,  $e_{BC}$  (первая буква, откуда вытекает ток, вторая куда втекает). Все они сдвинуты относительно друг друга на  $60^\circ$ ;

2) ЭДС возникающая в обмотках статора при вращении ротора  $e_A$ ,  $e_B$ ,  $e_C$ .

Проиллюстрируем это диаграммой (рис. 9.7).

Огибающая суммарная ЭДС характеризуется средним значением  $E_{cp}$ . В реальных условиях, коммутация отличается от мгновенной в точке которая изображена выше.

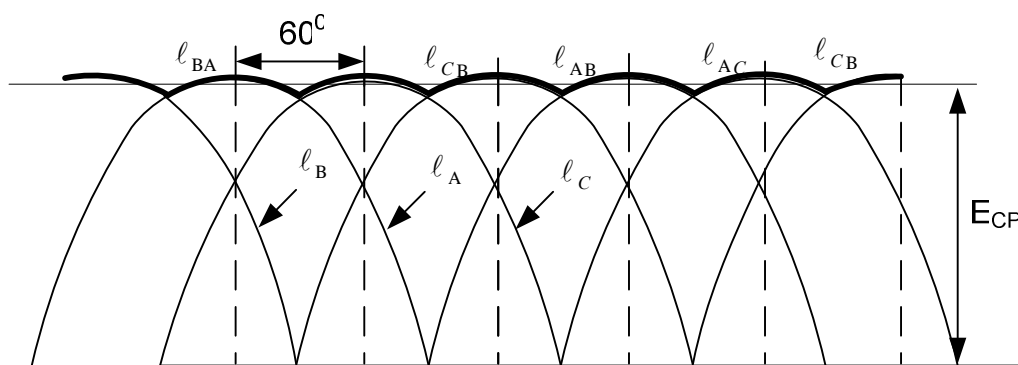


Рисунок 9.7 – ЭДС вентильного двигателя

Вынесем  $e_A$ ,  $e_B$ ,  $e_C$  на отдельную диаграмму (рис. 9.8) и покажем коммутацию ЭДС с фазы на фазу, а так же диаграмму изменения токов в условиях, когда коммутация осуществляется не мгновенно.

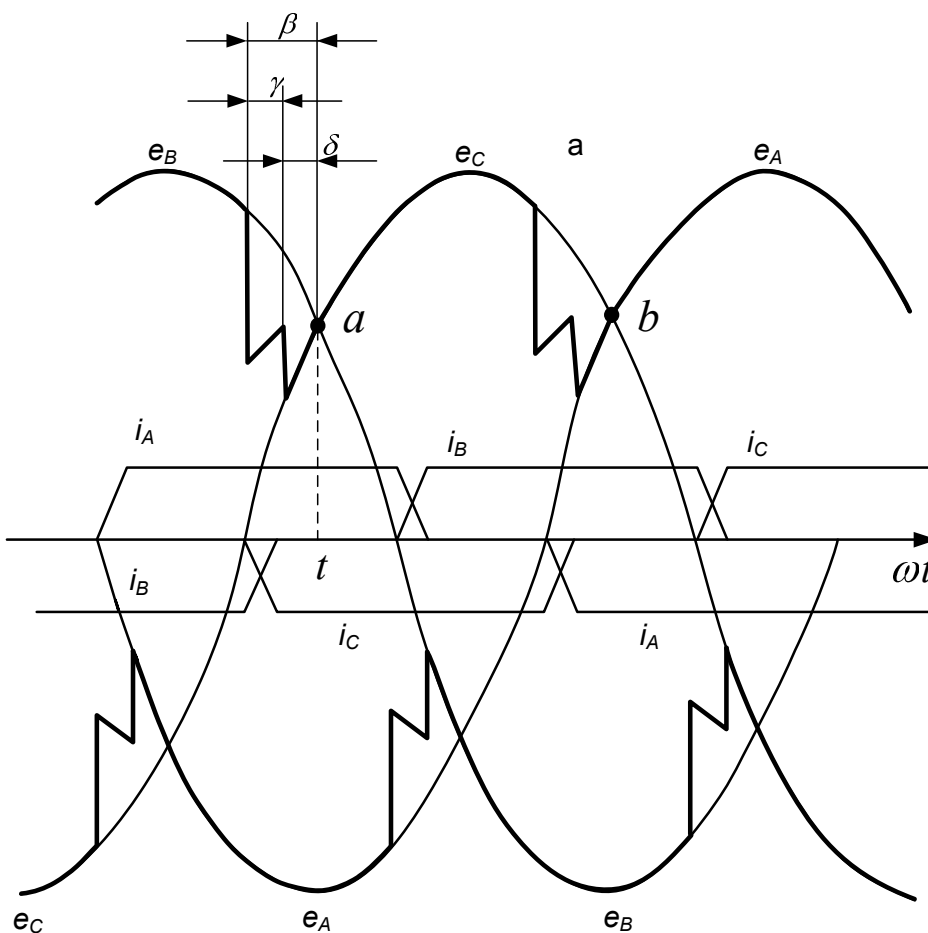


Рисунок 9.8 – Зависимость фазных токов и ЭДС от времени

Момент включения фазы, вступающей в работу, должен иметь опережение на угол  $\beta$  ( $\beta$ -угол опережения) относительно момента выравнивания ЭДС коммутирующей секции (фазы). Только при этом условии будут нормально открываться и закрываться тиристоры. Причем  $\beta > \varphi$  т. е. коммутация должна окан-

чиваться раньше, чем сравниваются ЭДС коммутирующих фаз, (ротор повернется на угол  $\varphi$ ). Период перехода тока (или изменения направления) (по аналогии) называется периодом коммутации и характеризуется углом  $\gamma$ . Так как тиристоры имеют определенный разброс параметров, то необходим некоторый запас по времени для их нормальной коммутации. Этот запас называют углом запаса и обозначают как  $\delta$ .

По своим характеристикам вентильные тяговые двигатели аналогичны двигателям постоянного тока, поэтому их иногда называют в литературе безколлекторными двигателями постоянного тока.

## 10 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Физический процесс образования намагничивающей силы в асинхронных двигателях в общем аналогичен процессу в вентильном двигателе, но отличается от него тем, что ток идет сразу по трем фазам, правда, в двух фазах ток в половину меньше, чем в одной. В тяговом электромашиностроении преимущественное применение нашли двигатели с короткозамкнутым ротором. Конструктивное исполнение машины будет рассмотрено несколько позднее, а пока остановимся на образовании намагничивающей силы и форм фазных токов и напряжений.

### 10.1. Формы фазных токов и напряжений

Идеальная форма фазных токов может быть изображена следующим образом:

- для инвертора тока (рис. 10.1). Этот процесс мы уже рассматривали в вентильном двигателе;

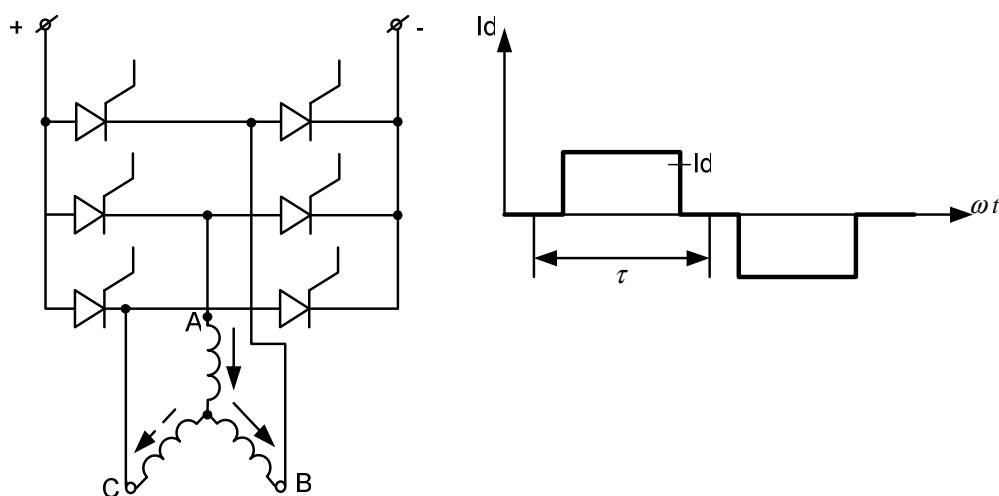


Рисунок 10.1 – Идеальная форма фазного тока инвертора тока



- для инвертора напряжения (рис 10.2)

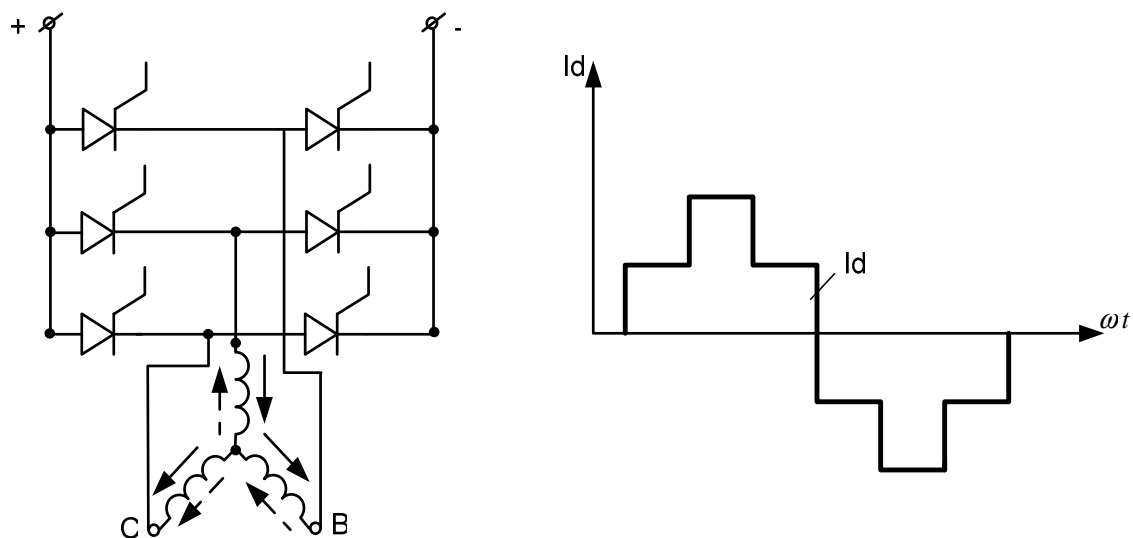


Рисунок 10.2 – Идеальная форма фазного тока инвертора напряжения

Формирование трехфазной системы токов в трехфазной обмотке (рис. 10.2) обеспечивается следующим образом. По одной из обмоток протекает ток  $I_d$ , по двум другим ток  $I_d/2$ . Принятие той или иной формы тока неизбежно приведет к созданию вполне определенной аппаратуры управления и инвертора.

В реальных условиях, в последней схеме, так же как и в рассматриваемой ранее, процесс изменения тока будет носить немгновенный характер.

С учетом конечного времени коммутации фазные токи будут иметь для инверторного тока форму, представленную на рис. 10.3.

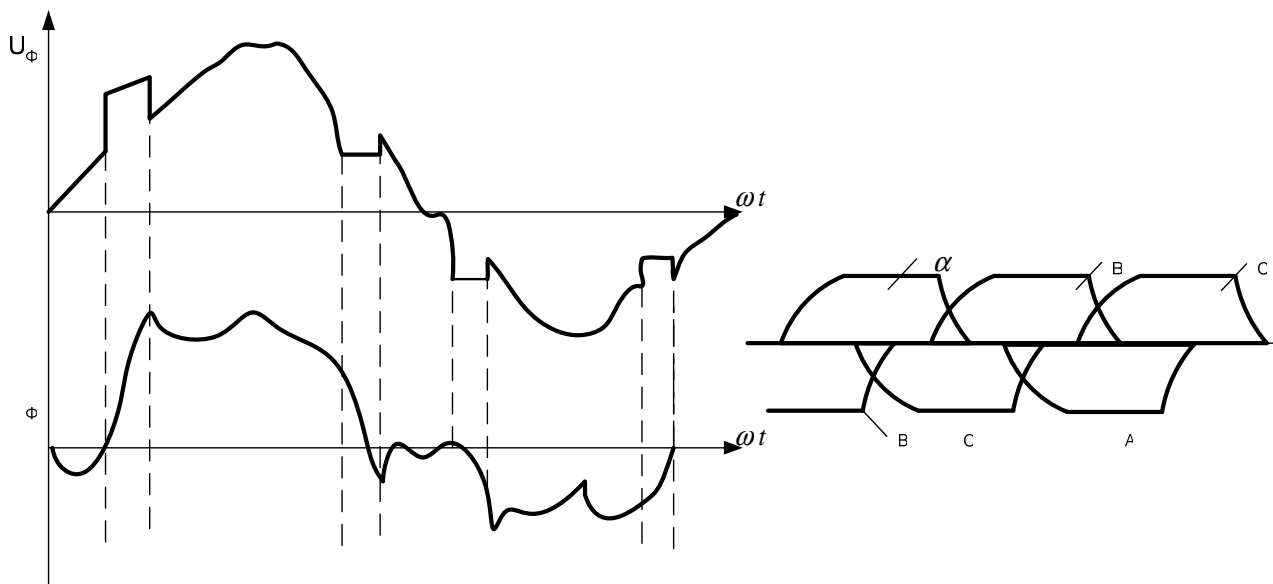


Рисунок 10.3 – Формы фазных токов и напряжений

Провалы в форме напряжения происходят из-за коммутации токов.

Для инвертора напряжения наиболее вероятную форму фазного тока можно получить наложением кривой фазной ЭДС на идеализированную форму фазного напряжения (в идеальном случае форма фазной ЭДС аналогична форме фазных токов). Осциллограммы фазных напряжений и токов двигателя НБ 602 представлены на рисунке 10.4.

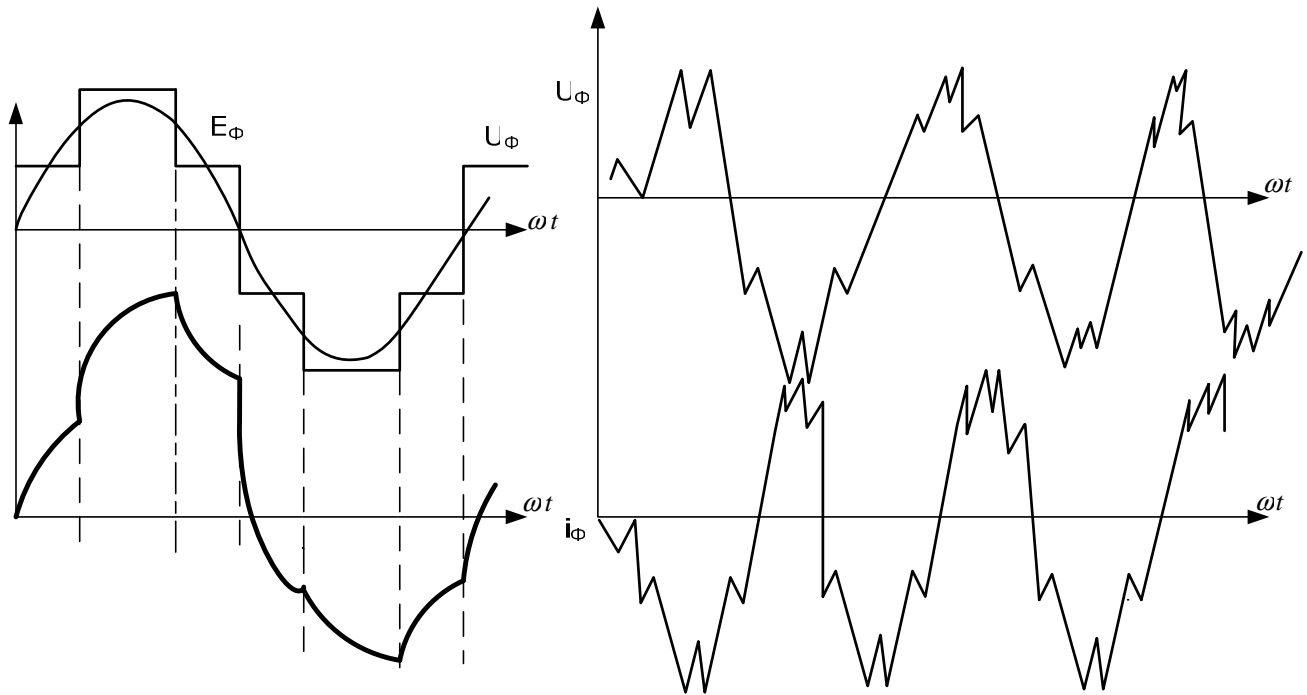


Рисунок 10.4 – Осциллограммы фазных напряжений и токов двигателя НБ 602

Из осциллограмм и предыдущих построений видно, что на несущую гармонику накладываются высшие гармонические составляющие 92...100 Гц.

Любые высшие гармонические составляющие ведут к добавочным потерям. На современном уровне преобразовательной техники можно существенно снизить высшие гармоники тока, введя в преобразователь широтно-импульсную модуляцию напряжения. Однако это заметно усложняет и удорожает конструкцию, снижая КПД привода.

Для идеализированной формы фазного напряжения  $U_\phi$  спектральный ряд высших гармоник можно определить разложением  $U_\phi$  в ряд Фурье

$$U_\phi = \frac{2}{\pi} U_d \left( \sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t - \dots \right).$$

Параметры высших гармонических составляющих позволяют определить потери искажения формы кривых. Кроме того, они необходимы для определения моментов асинхронных двигателей. Хотелось бы отметить, что содержание высших гармоник не падает по мере увеличения номера гармоники, а носит пе-

ременный характер. Отношения напряжения высшей гармоники и основной для двигателя НБ 602 представлены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Отношения напряжения высшей гармоники  
и основной для двигателя НБ 602

Номер гармоники	1	5	7	11	13	17	19
$U_v/U_1$	0,95	0,19	0,136	0,86	0,7	0,55	0,5

Таким же образом можно определить гармонический состав токов. Имея такие исходные данные, можно рассчитать электромагнитные моменты.

Электромагнитные моменты в асинхронных тяговых двигателях различаются:

- 1) на основной постоянный момент от первых гармоник тока и магнитного потока;
- 2) постоянные моменты от высших временных гармоник тока и потока одного порядка;
- 3) постоянные моменты от высших пространственных гармоник поля;
- 4) знакопеременные моменты от высших временных гармоник тока и первой гармоники потока.

Момент от первой гармоники тока и потока

$$M_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_1 \omega_1 K_{об1} \Phi I_2' \cos \psi_2,$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $m_1, \omega_1$  – число фаз и число витков статорной обмотки;  $K_{об1}$  – обмоточный коэффициент статорной обмотки;  $\Phi$  – магнитный поток;  $I_2'$  – ток ротора, приведенный к обмотке статора;  $\psi_2$  – угол между вектором тока  $I_2'$  и перпендикуляром к вектору потока  $\Phi$ .

## 10.2. Моменты от высших временных гармоник тока и потока одного порядка

**Токи высших гармоник обмотки статора** создают магнитные потоки гармоник тех же номеров и соответствующие им токи в обмотке ротора. От взаимодействия токов и потоков одинаковых номеров возникают постоянные моменты, которые действуют как согласно, так и встречно основному моменту, это видно из разложения  $U_{\Phi}$  в ряд Фурье.

Моменты можно определить аналогично основному моменту

$$M_v = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_1 \omega_1 K_{об1} \Phi_v I_{2v}' \cos \psi_{2v}.$$

Обычно эти моменты невелики, а их суммарный эффект незначителен, поэтому ими пренебрегают.

**Моменты от высших пространственных гармоник поля** возникают при питании асинхронных двигателей синусоидальным током. Появляются они из-за зубчатой структуры статора. В связи с этим применяют скосы пазов и оригинальные способы регулирования. Допустим, частотное регулирование позволяет почти полностью компенсировать эти моменты. В связи с последним, их как правило, не учитывают.

**Знакопеременные моменты от высших гармоник тока и первой гармоники потока** в отличие от предыдущих могут быть значительными и определяться как

$$M_{1v} = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_1 \omega_1 K_{об1} \Phi_1 I_{1v}' \cos \Psi_{2v} \sin(v-1)\omega t,$$

в этом выражении

$$I_{2v}' = \frac{U_v}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + v^2 \cdot (x_1 + x_2')^2}};$$

$$\cos \Psi_{2v} = \frac{r_2'}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + v^2 (x_1 + x_2')^2}},$$

где  $r_1, r_2', x_1, x_2'$  – активные и индуктивные сопротивления статорной и приведенные роторной к статорной обмоток.

Эти моменты наиболее существенны в момент пуска, когда частота питающего напряжения  $\approx 1$  Гц, а частота переменного момента 5...6 Гц. Может наблюдаться раскачивание остова.

Эксперименты показывают, что уменьшения переменного момента при пуске можно добиться, уменьшая амплитуды высших гармоник, либо повышая пусковую частоту.

### 10.3 Коэффициент мощности и КПД

Высшие гармоники тока статора создают потоки рассеяния статорной обмотки, потоки взаимной индукции, обуславливающие ток ротора, в свою очередь вызывающий поток рассеяния роторной обмотки. Эти потоки снижают коэффициент мощности АТД, который определяется

$$K_i = \frac{\sum_{v=1,5,7}^{17} U_v I_v \cos \varphi_v}{\sqrt{\sum_{v=1,5,7}^{17} U_v^2} \sqrt{\sum_{v=1,5,7}^{17} I_v^2}}.$$

В числителе выражения сумма активных мощностей для гармоник от 1-й по 17-ю. В знаменателе – полная мощность асинхронного двигателя от этих гармоник.

С помощью ЭВМ разложить кривые напряжения и тока в ряд Фурье не представляется затруднительным. При этом можно определить как амплитуды гармоник, так и их фазовый сдвиг  $\cos \varphi_v$  – относительно первой гармоники.

Коэффициент полезного действия асинхронного тягового двигателя с учетом потерь от всех гармоник:

$$\eta = \left[ \frac{\sum_{v=1,5,7..}^{17} P_{1v} - \sum_{v=1,5,7}^{17} (\Delta P_{mv} + \Delta P_{cv} + \Delta P_{добv} + \Delta P_{мехv})}{\sum_{v=1,5,7}^{17} P_{1v}} \right],$$

где  $P_{1v}$  – подведенная мощность от всех гармоник;  $\Delta P_{mv}$ ,  $\Delta P_{cv}$ ,  $\Delta P_{добv}$ ,  $\Delta P_{мехv}$  – электрические, магнитные, добавочные и механические потери в асинхронном двигателе соответствующих временных гармоник.

Поскольку было установлено, что высшие гармоники практически не участвуют в создании момента, а лишь обуславливают добавочные потери, то без серьезного отклонения от истины можно записать

$$\eta = \frac{(3U_1 I_1 \cos \varphi_1 - \sum \Delta P)}{3U_1 I_1 \cos \varphi_1}.$$

Формула аналогична двигателям постоянного тока за исключением учета числа фаз (множитель 3) и угла между  $U$  и  $I$  ( $\cos \varphi_1$ ).

#### 10.4 Принцип регулирования асинхронного тягового двигателя

Независимо от тягового двигателя на ЭПС должны обеспечиваться основные зависимости: тяговые характеристики и характеристики мощности. Причем примерный их вид для обеспечения нормальной работы в режиме пуска и движения должен быть примерно следующий.

Причем точка 1 соответствует номинальной мощности, которая поддерживается до точки 2.

От точки 2 до точки 3, как видно из рисунка, мощность падает, однако это скорее затруднение двигателей постоянного тока чем асинхронных двигателей. Дело в том, что реализация больших мощностей в области высоких скоростей связана с ухудшением условий коммутации и именно этими условиями ограничена.

Так же, как и у коллекторных двигателей (это можно увидеть из приведенного ранее уравнения электромагнитного момента) регулирование может осуществляться с помощью, по крайней мере, двух параметров: питающего напряжения  $U_1$  и частоты  $f_1$ , примерно пропорциональной скорости движения. Можно показать графики входных параметров асинхронных тяговых двигателей, характерных для электровоза (рис. 10.6).

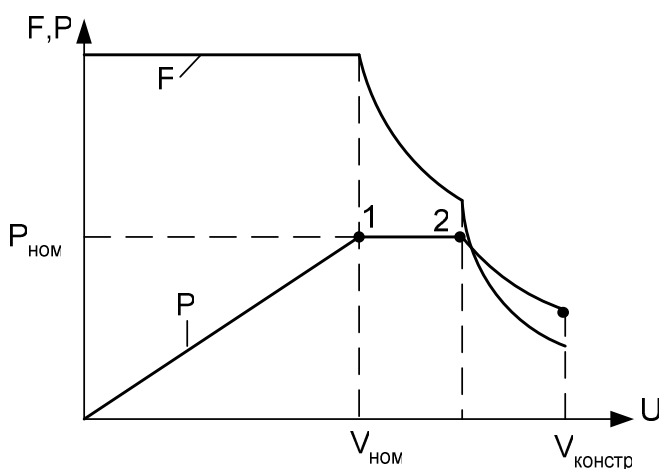


Рисунок 10.5 – Токковые характеристики и характеристики мощности асинхронного двигателя

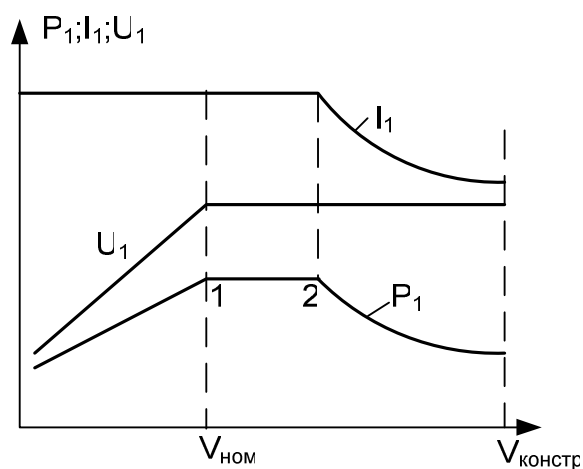


Рисунок 10.6 – Параметры асинхронных тяговых двигателей, характерные для электровоза

Применительно к асинхронным нерегулируемым двигателям  $U_1 = \text{const}$ ;  $f_1 = \text{const}$  и все остальные параметры также постоянны. Асинхронные двигатели призваны работать при широком изменении вращающего момента, напряжения, частоты, потока и т. д. В этих условиях большинство параметров становятся переменными, зависящими от потока, а также от  $U_1$  и частот  $f_1$  и  $f_2$ ,  $f_2$  – частота скольжения.

Рассмотрим работу асинхронных машин в двигательном режиме (рис. 10.7).

Асинхронной называют машину переменного тока, у которой в установившемся режиме работы основное магнитное поле и ротор вращаются с разными угловыми скоростями (т. е. не синхронно).

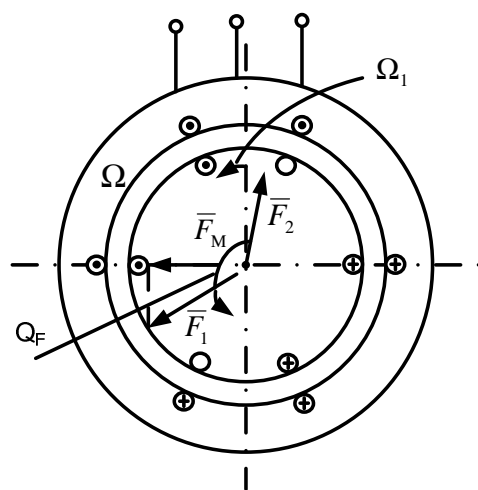


Рисунок 10.7 – Принцип работы асинхронного тягового двигателя в двигательном режиме

Принцип действия такой машины основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля, созданного неподвижной трех- или многофазной статорной обмоткой, присоединенной к сети с токами, индуцированными этим полем в короткозамкнутой обмотке ротора. Многофазная обмотка статора, обтекаемая переменными токами частоты  $f_1$ , образует электромагнит в каждый момент времени, ось  $\overline{F_1}$  которого вращается с угловой скоростью

$$\Omega_1 = 2\pi f_1 / p,$$

где  $p$  – число пар полюсов.

Это магнитное поле увлекает за собой короткозамкнутый ротор, который в двигательном режиме вращается с несколько меньшей угловой скоростью

$$\Omega < \Omega_1,$$

причем

$$\Omega = \Omega_1(1 - S),$$

где величина  $S = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$  и есть скольжение.

Магнитное поле обгоняет ротор с угловой скоростью

$$\Omega_S = \Omega_1 - \Omega$$

и индуцирует в его обмотке ЭДС, частота которой

$$f_2 = p\Omega_S / 2\pi$$

или

$$f_2 = p(\Omega_1 - \Omega) / 2\pi$$

отсюда

$$f_2 = p[\Omega_1 - \Omega_1(1 - S)] / 2\pi$$

или

$$f_2 = p\Omega_1 S / 2\pi.$$

Из формулы видно, что

$$f_2 = S f_1.$$

Многофазовая обмотка ротора создает вращающиеся магнитное поле с осью  $F_2$  за счет поля статора. Это поле вращается вслед за обмоткой ротора с угловой скоростью

$$\Omega_2 = S\Omega_1,$$

между этими векторами есть угол  $\Theta_F$ . Таким образом, магнитное поле статора вращается в пространстве одновременно с обмоткой ротора, опережая его на некоторый угол (по векторам).

При взаимодействии электромагнитов ротора и статора и возникает момент

$$M = kF_a F_f \sin \Theta_F$$

или

$$M = k\overline{F_1}\overline{F_2} \sin \Theta_F ,$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий конструкционные особенности машины.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать очень важные выводы:

1) основное магнитное поле машины, вращающееся в пространстве с угловой скоростью  $\Omega_1$ , создается неподвижной многофазной статорной обмоткой, обтекаемой токами частоты  $f_1$ . При этом ток в обмотке статора зависит от нагрузки машины;

2) ротор вращается не синхронно с основным магнитным полем. При этом угловая скорость ротора зависит от нагрузки, т. е. от момента на валу машины;

3) электрическая энергия подводится к асинхронному двигателю только со стороны статора, роторная же обмотка замкнута накоротко и токи в ней индуцируются основным магнитным полем.

А уравнения электромагнитного момента лишний раз это подтверждают, поскольку индуктивные сопротивления зависят от частоты вращения поля статора, а так же от величины скольжения.

Рассмотрим теперь зависимости магнитного потока  $\Phi$ , ЭДС  $E_1$  и частоты тока ротора  $f_2$  от скорости движения (рис. 10.8).

Для сохранения значительной силы тяги в зоне скоростей от 0 до  $V_{III}$  необходимо иметь постоянный наибольший электромагнитный момент. Для того чтобы это реализовать необходимо осуществлять запуск с максимальным магнитным потоком. В конечном счете, должно быть выдержано соотношение

$$\frac{E_1}{f_1} = \text{const.}$$

ЭДС при скоростях, близких к  $V_{ном}$ , мало отличается от напряжения  $U_1$ , однако в области малых скоростей это заметно.

Для улучшения процесса пуска желательно сохранить ток  $I_1$  неизменным.

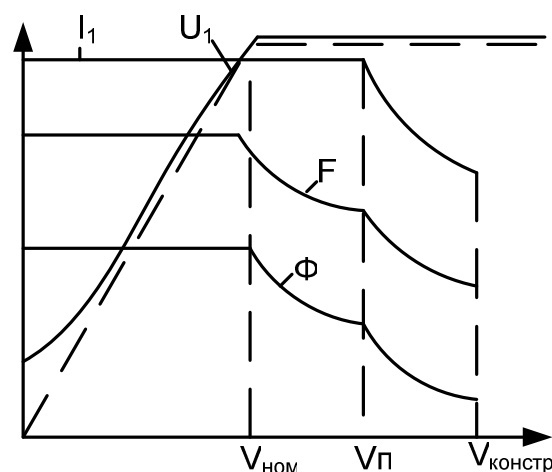


Рисунок 10.8 – Зависимости магнитного потока, эдс от скорости движения



При скоростях движения больше  $V_{ном}$  мощность может поддерживаться постоянной

$$U_1 \approx E_1 = 4,44f_1\omega_1K_{об1}\Phi,$$

т. е. магнитный поток будет уменьшаться с ростом частоты. Если же сохранить постоянной частоту вращения ротора, то уменьшение потока приведет к снижению тока в роторной и статорной обмотках, а следовательно, к снижению мощности.

Для пассажирских и грузовых электровозов вопрос поддержания скорости или мощности решается по-разному. Для пассажирских электровозов требуется наращивать мощность и скорость вплоть до  $V_{констр.}$  Для грузовых электровозов, в соответствии с их тяговой характеристикой, надобности в поддержании мощности вплоть до  $V_{констр.}$  нет, поэтому можно допустить снижение тока за счет поддержания частоты вращения  $f_2 = \text{const}$ . Имея основные соотношения для асинхронных двигателей, можно, оперируя тремя параметрами, регулировать мощность. Контролируется обычно частота вращения

$$n = 60(f_1 - f_2)/p,$$

где  $f_1$  – частота вращения поля статора обычно задается такой, чтобы обеспечить необходимое значение  $f_2$  и  $n$ . Вторая регулирующая величина  $U_1$ .

Для того чтобы оценить регулировочные свойства тяговых асинхронных двигателей приведем еще одно выражение, определяющее электромагнитный момент на валу двигателя, которое отличается от ранее записанных лишь по форме

$$M_{\text{э}} = \frac{1}{\sqrt{2}} p K_B \Phi^2 f_2 \cdot \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (2\pi f_2 L_{2S})^2}},$$

где  $K_B = 1,05...1,11$  – коэффициент формы поля.

Последняя дробь в этом выражении есть не что иное, как  $\cos \Psi_2^2 / r_2$ .

Из приведенного уравнения видно, что один и тот же момент может быть получен для различных сочетаний тока, а значит частоты и магнитного потока

$$\Phi I_2' \cos \Psi_2 = \text{const},$$

что позволяет поддерживать постоянный момент, стремясь к оптимизации по току. Тем самым сокращаются потери.

Широко распространен закон регулирования асинхронного частотно-регулируемого двигателя, установленный академиком М.П. Костенко.

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M_1}{M_{1н}}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_{1ном}},$$

где  $U_1, f_1, M_1$  – текущее значение напряжения частоты и вращающего момента;  $U_{1н}, f_{1н}, M_{1н}$  – номинальные значения этих же величин.

Из последнего уравнения можно сделать вывод, что для поддержания во всех режимах значительного момента при регулировании частоты  $f_1$  необходимо иметь значительный магнитный поток, значение которого обеспечивается подводимым напряжением.

### 10.5 Статическая устойчивость асинхронных тяговых двигателей

У нерегулируемых и регулируемых по частоте и напряжению асинхронных тяговых двигателей есть серьезные отличия по условию статической устойчивости. У нерегулируемых двигателей, используемых на ЭПС в качестве приводов вспомогательных машин, оценивают статическую устойчивость как перегрузочную способность по моменту. Эта оценка характеризует  $M_{\max}$  и максимальное скольжение  $S_{\max}$  для двигателя данного типа. Попытка выйти за эти пределы приводит к срыву скольжения «опрокидыванию» двигателя и короткому замыканию.

Как правило, кратность максимального и номинального момента составляют 2...3.

Для частотно-регулируемых асинхронных двигателей критический момент определяется критической частотой вращения ротора  $f_{2к}$ . Причем этот момент может быть даже меньше номинального. Все будет определяться параметрами  $U_1$  и  $f_1$  т. е. статическая устойчивость в данном случае – это характеристика.

Для того чтобы определить максимальное значение момента необходимо взять дифференциал по  $f_2$  от последнего сомножителя в уравнении  $M_2$  и приравнять его к «0» чтобы определить максимум этой величины т. е.

$$\frac{\partial}{\partial f_2} \left[ \frac{f_2}{\sqrt{r_2^2 + (2\pi f_2 L_{2S})^2}} \right] = 0,$$

где  $r_2$  – активное сопротивление стержня роторной обмотки;  $L_{2S}$  – индуктивность стержня.

Получим критическую частоту

$$f_{2к} = r_2 / 2\pi L_{2S}. \quad (10.1)$$

Тогда максимальный момент в зоне разгона может быть определен как

$$M_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} p K_B r_2 \Phi^2 f_{2к} / \sqrt{r_2^2 + (2\pi f_{2к} L_{2S})^2},$$

учитывая по (10.1), что

$$r_2 = f_{2к} \cdot 2\pi L_{2S}$$

и проводя несложные преобразования, получим

$$M_{\max} = \frac{1}{4\pi\sqrt{2}} p K_B N_2 \frac{\Phi^2}{L_{2S}},$$

где  $N_2$  – число стержней обмотки ротора.

Однако для практики важнее иметь следующее соотношение

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} \approx 0,85 \frac{f_{2к}}{f_{2\text{ном}}}.$$

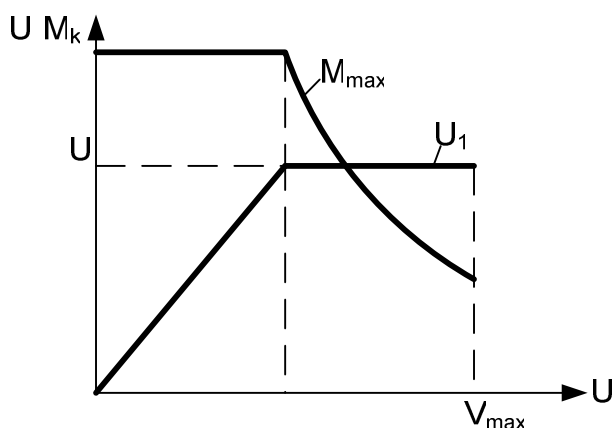


Рисунок 10.9 – Соотношение критических моментов и скорости для различных значений напряжений

Определив критическое значение по (10.1), можно, имея  $M_{\text{ном}}$  и  $f_{2\text{ном}}$ , всегда определить  $M_{\max}$  (коэффициент 0,85 получается из уравнения М.П. Костенко в случае, когда  $\Phi_{\max} = 1,17_{\text{ном}}$ ).

Если рассмотреть условия статической устойчивости в зоне скоростей, где  $f_1 < f_{2к}$ , то в этом случае условия определения предельного момента не имеют смысла. Момент в данном случае ограничен превышением температуры от токов. Соотношения критических моментов и скорости для различных значений напряжения приведены на рис. 10.9.

## 10.6 Особенности конструкции асинхронных тяговых двигателей

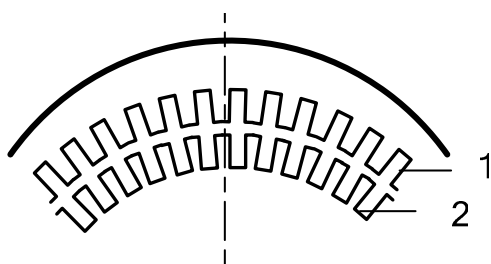


Рисунок 10.10 – Фрагмент разреза асинхронного тягового двигателя: 1 – пазы статорной обмотки; 2 – пазы роторной обмотки

Особенности конструкции асинхронных тяговых двигателей связаны с установкой его на ЭПС. Это предопределяет его конструкцию, как по способу крепления, так и по мощности.

Остов асинхронного тягового двигателя имеет круглую форму с элементами крепления тягового двигателя к раме тележки. Корпус выполняется из различных, в том числе и алюминиевых сплавов с ребрами жесткости.

В разрезе асинхронная машина представлена на рисунке 10.10.

Для статорной обмотки используют только открытые прямоугольные пазы. Причем есть некоторые особенности в креплении обмотки статора. В асинхронных двигателях желательно использовать

магнитные клинья, изготовленные прессованием из различных магнитных материалов. Это позволяет уменьшить коэффициент воздушного зазора и сократить пульсации магнитного потока.

Обмотка статора также имеет некоторые особенности по сравнению с обмотками машин постоянного тока. В статорной обмотке асинхронного двигателя из-за повышенной частоты питающего напряжения, которая, как правило, достигает значений 140 Гц, происходит вытеснения тока к поверхности обмотки и увеличение потерь.

Снижение потерь из-за эффекта вытеснения достигается путем выбора рационального сечения проводника и его расположения в пазу. В асинхронных двигателях проводники в основном располагаются «плашмя».

Обмотка ротора. На обмотку ротора накладываются серьезные ограничения и предъявляются требования к ее конструкции. Во время пуска нагрев роторной обмотки (впрочем, как и статорной) может быть значительным. Кроме того, крепление обмотки должно быть надежным так как при пуске в холодное время, допустим с температурой  $-60^{\circ}\text{C}$ , за короткое время обмотка нагревается до  $100...150^{\circ}\text{C}$ . Это очень большой перепад температур. Для улучшения теплоотвода необходимо иметь плотное прилегание стержней роторной обмотки и стенкам. Стержень должен быть упруго закреплен в пазу.

Для асинхронных двигателей мощностью до 300 кВт обычно используют в качестве метода изготовления роторной обмотки, заливку пазов алюминиевым сплавом.

Однако метод заливки обладает существенным недостатком: из-за качества литья образуются раковины, изменяющие сопротивление стержней, а значит и мощность машины. Когда машина используется индивидуально, это не имеет особого значения. А вот на ЭПС, где колесно-моторные блоки подбирают по характеристикам, данный факт приобретает большое значение. В связи с этим, стержни изготавливают заранее, опрессовывают, и закладывают в пазы.

Виды пазов и способы закладки стержней, применяемые в асинхронных двигателях приведены на рисунке 10.11.

Обмотка ротора, изображенная на рисунке 10.11,а, технологична и обладает эластичностью при входе в коротко замыкающее кольцо. Однако из-за отсутствия упругого элемента в пазу стержни могут ослабляться.

На рисунках 10.11,б и 10.11,в изображены стержни, лишенные этих недостатков, но технология их изготовления сложнее.

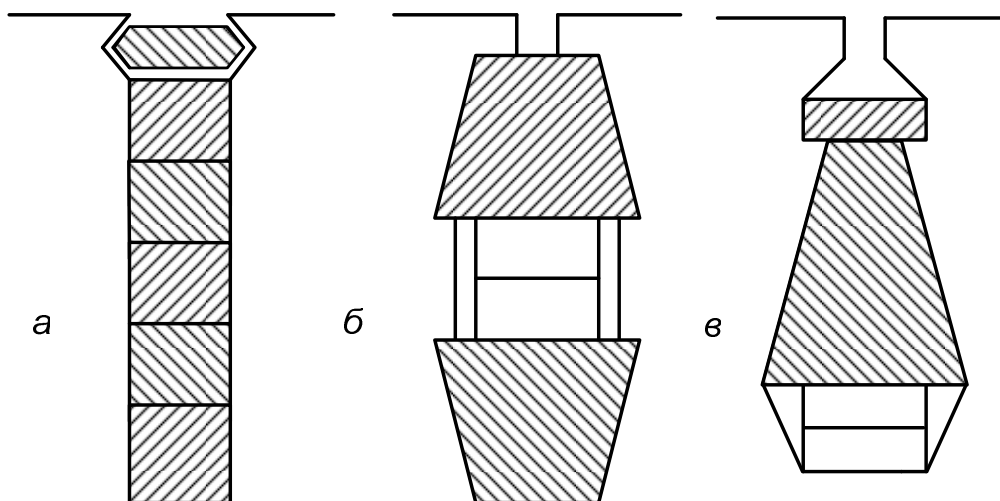


Рисунок 10.11 – Виды пазов и стержней

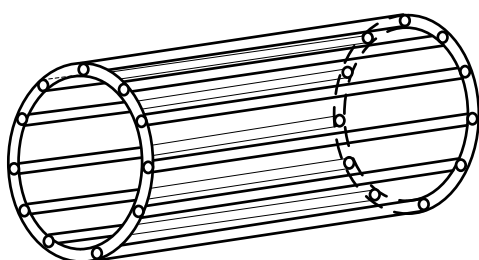


Рисунок 10.12 – Обмотка ротора

Схематичное изображение обмотки ротора приведено на рисунке 10.12.

В заключение несколько слов о воздушном зазоре и вентиляции. Как правило, зазор в АТД меньше чем в двигателях постоянного тока и составляет 2,5...3 мм. Охлаждение аналогично двигателям постоянного тока – это осевая вентиляция с каналами в роторе и статоре.

## 11 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Говоря о современных направлениях в тяговом электромашиностроении нельзя не сказать о линейных тяговых двигателях. В настоящее время на ЭПС применяют различные двигатели. Это и двигатели постоянного тока и вентильные и асинхронные. Но все они обладают одним свойством: передают тяговое усилие на колесную пару. При этом сила тяги ограничена нагрузкой на ось и коэффициентом сцепления

$$F_k = p \cdot \Psi.$$

Для значительного повышения силы тяги необходимо увеличивать нагрузку на ось, (что нельзя делать беспрестельно по условиям прочности пути и оси), или увеличивать коэффициент сцепления, что также в условиях гладких рельсов затруднительно. Кроме того, при наметившейся тенденции увеличения скоростей вопросы взаимодействия колеса и пути встают еще острее. Выход из создавшегося положения может быть найден в использовании линейных асинхронных двигателей ЛНД.

Необходимо отметить, что впервые потребность в ЛАД возникла в XIX веке. Однако они не получили распространения из-за массогабаритных показателей. В СССР освоение ЛАД началось примерно в 1920 году с использованием их в ударных установках (электропривод). Это работы М. П. Костенко, Я. С. Япольского. Затем, уже в послевоенное время, ЛАД получили свое дальнейшее развитие в фундаментальных исследованиях Г. И. Штурмана, А. И. Вольдена и ряда других ученых.

Сила тяги, развиваемая линейным асинхронным двигателем, вызывается взаимодействием бегущего поля статора (первичного элемента, уложенного на ЭПС или в пути, и электрическими токами, индуцируемыми в реактивной шине) вторичном элементе, представляющего собой развернутый ротор. То есть по существу это разрезанная асинхронная машина.

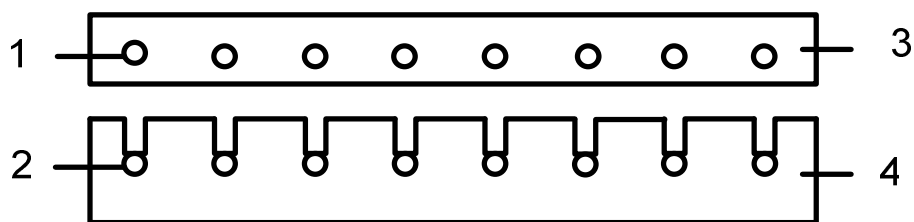


Рисунок 11.1 – Линейный двигатель:

1 – обмотка статора; 2 – обмотка ротора; 3 – вторичный элемент;  
4 – первичный элемент

Реальная скорость перемещения определяется как и в АД – скольжением

$$S = (V_1 - V_p) / V_1;$$

$$V_p = V_1(1 - S),$$

где  $V_1$  – скорость бегущего поля индуктора.

Естественно, что один из элементов должен быть во всю длину участка работы этого двигателя. Поэтому такие машины выполняют либо с коротким первичным, либо с коротким вторичным элементом. И возбуждают только те секции над (или под) которыми проходит ротор. Казалось бы, все просто, но трудность заключается в том, чтобы создать силу не только горизонтального перемещения, но и магнитного подвешивания т.е. поперечную силу. Кроме того, увеличенные зазоры между первичным и вторичным элементом искажают магнитные поля, вызывая несимметрию магнитного потока.

Эту составляющую приходится убирать с помощью дополнительных катушек. Несмотря на сложности, в настоящее время уже созданы опытные образцы подвижного состава с линейными тяговыми двигателями.

## 12 ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ И МАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 12.1 Назначение вспомогательных машин

Вспомогательные машины на ЭПС различают по их назначению:

- 1) мотор-компрессоры – обеспечивают питание сжатым воздухом тормозной системы поезда и аппаратов с электропневматическими устройствами;
- 2) мотор-вентиляторы – обеспечивают принудительную вентиляцию тяговых двигателей и другого электрического оборудования;
- 3) генераторы управления служат для питания цепей управления и освещения током нужного напряжения, а так же заряда аккумуляторной батареи. В последнее время для этой цепи используют статические преобразователи;
- 4) мотор-генераторы устанавливаются на локомотивах с электрическим торможением, служат для питания обмоток возбуждения тяговых двигателей при торможении;
- 5) расцепители фаз – обеспечивают питание асинхронных трехфазных двигателей;
- 6) масляные мотор-насосы обеспечивают циркуляцию жидкости в трансформаторе;
- 7) делители напряжения служат для питания вспомогательных машин, рассчитанных на 1500 В от контактной сети с напряжением 3000 В.

Рассмотрим особенности их использования на ЭПС постоянного и переменного тока и затем более детально остановимся на конструкции каждой из этих машин.

### 12.2 Особенности конструкции вспомогательных машин ЭПС постоянного тока

Во многом конструкция машин, это относится и к постоянному и к переменному току зависит от рода питания локомотива в целом от места расположения самих машин.

Так, на ЭПС постоянного тока в основном установлены в качестве вспомогательных машин двигатели постоянного тока. К вспомогательным машинам, конечно, менее жесткие требования относительно массогабаритных показателей, зато высоки требования к надежности. Отказ, к примеру, мотор-компрессора приводит к отказу тормозной системы поезда. Этот перечень можно было бы распространить и на другие вспомогательные машины.

Удельная масса вспомогательных машин находится в пределах 25...50 кг/кВт. Не велик и КПД. Если у ТЭД он составляет порядка 0,9, то у вспомогательных машин 0,7...0,8.

Учитывая расположение машин (в кузове или под кузовом) их, как правило, выполняют закрытого исполнения с самовентиляцией.

Поскольку машины постоянного тока выполняют на 500 В, а мощность их не велика, то плотность тока низкая и это позволяет использовать в качестве обмоточного медные круглые провода в шелковой изоляции и эмалированные.

В качестве обмотки якоря используются многовинтовые секции. При этом линейная нагрузка снижена и соответственно улучшены коммутационные условия.

Несколько слов следует сказать и о магнитных материалах. Характеристики намагничивания вспомогательных машин являются мягкими с малой степенью насыщения. Это позволяет, в свою очередь выполнить мягкими электромеханические характеристики двигателей и тем самым улучшить регулировочные свойства машин.

### 12.3 Вспомогательные машины ЭПС переменного тока

На ЭПС переменного тока есть переменное напряжение частотой 50 Гц, и это существенно расширяет возможности и перспективы развития вспомогательных машин. И конечно же, можно использовать асинхронные двигатели. Но фаз, как известно, всего две, а надо, согласно, изученной нами теории, – три, или специальные схемы пуска. Из этого положения есть ряд выходов.

Применение дополнительной вспомогательной фазы и конденсаторов (рис. 12.1).

Для реализации этого способа включается вспомогательная фаза и конденсаторы таким образом и с такими параметрами, чтобы обеспечить угол между током и напряжением главной фазы, равной  $\pi/4$ . Причем емкость есть величина постоянная и стабильность работы обеспечивает только в одном режиме. Это один недостаток и есть второй недостаток – чем мощнее двигатель, тем больше батареи конденсаторов. Поэтому чаще всего используют другой способ – расщепители фаз (рис. 12.2).

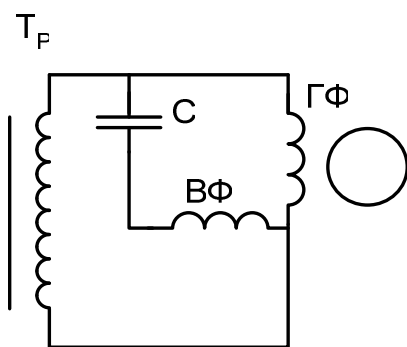


Рисунок 12.1 – Двигатель со вспомогательной фазой и конденсатором

Преимущества этого способа очевидны:

- 1) можно использовать типовые асинхронные двигатели;
- 2) устойчивость режимов работы;
- 3) легкость, надежность и т. д.

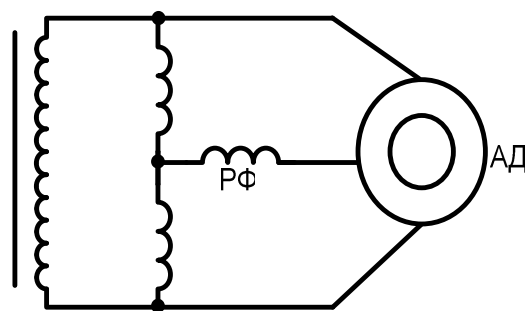


Рисунок 12.2 – Подключение вспомогательных машин к расщепителю фаз



Но этот способ требует дополнительного оборудования – машины, которая называется расщепитель фаз.

Это машинные синхронные или асинхронные преобразователи однофазного тока в трехфазный.

Однако и расщепители фаз не обеспечивают симметрии напряжения при всех нагрузках. Но самое важное то, что напряжение в к.с. колеблется в очень широких пределах от 19 до 29 кВ при номинальном напряжении 25 кВ. Снижение напряжения приводит к увеличению времени пуска и нагрев обмоток пусковыми токами.

В связи с этим рекомендуется выбирать машины со значительными запасами по мощности и повышенным скольжением. Такие машины более устойчивы к перепадам напряжения.

Асинхронные машины из-за стабильности частоты вращения, особенно при пониженном напряжении, имеют преимущества перед машинами постоянного тока.

#### 12.4 Моторы-вентиляторы

Само название говорит о том, что это спаренный агрегат двигатель электрический и вентилятор. По типу вентиляторы различают:

- 1) осевого (пропеллерного типа);
- 2) радиального типа.

Поскольку вентиляторы имеют почти постоянную нагрузку они сопрягаются с другими машинами, например, генераторами управления (рис. 12.3).

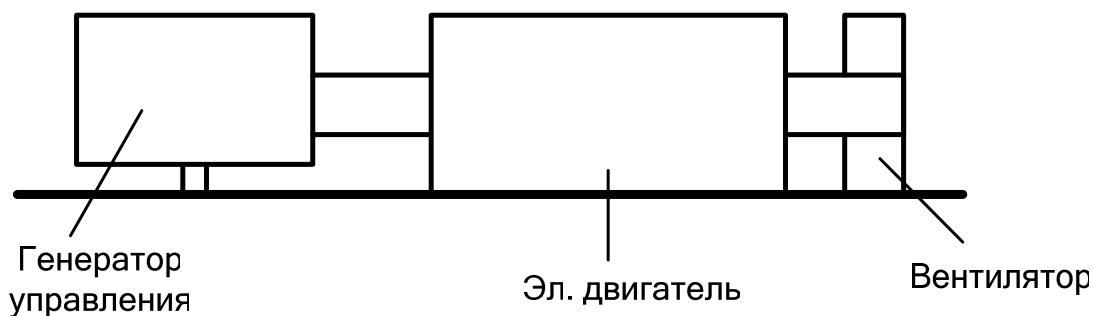


Рисунок 12.3 – Принцип подключения генератора управления

Мощность двигателя мотора-вентилятора определяется по формуле

$$P_{\text{МВ}} = 0,736QH / (60\eta_{\text{В}} \cdot 75)$$

и зависит от объема необходимого воздуха  $Q$  и статического напора  $H$ .

КПД вентиляторов очень низок и составляет:

$\eta_{\text{В}} = 0,45 \div 0,55$  – для радиального типа;

$\eta_{\text{В}} = 0,57 \div 0,73$  – для осевого типа.

Конструкции вентиляторов можно пояснить с использованием рисунка 12.4.

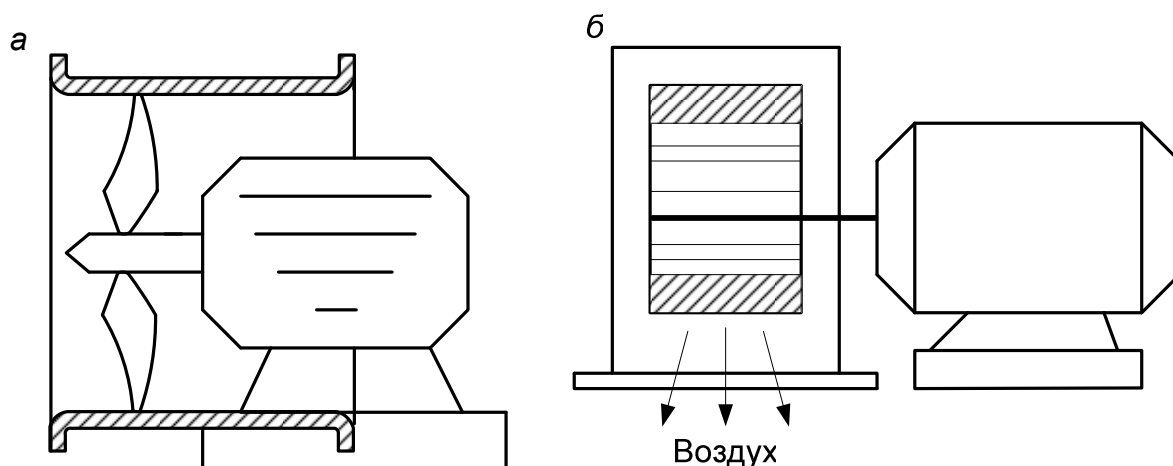


Рисунок 12.4 – Конструкции вентиляторов: *а* – осевого типа; *б* – центробежного типа

Широкое распространение получили в последнее время мотор-вентиляторы, с аэродинамической очисткой воздуха. Суть такой очистки показана на рис. 12.5.

Воздух всасывается через входное отверстие 4 кожуха 5 с большой скоростью и резко изменяет свое направление, ударяясь о конус 2 при этом тяжелые частицы, стремясь сохранить направление движения, попадают в кольцевую щель *а* нижнего листа ротора 3. Основной воздушный поток направляется, как и во всех центробежных вентиляторах. Но лопатки этого вентилятора выполнены конусно. В связи с этим, скорость воздуха у основания колеса выше, чем у начала.

Поэтому под действием центробежных сил у основания концентрируются не удаленные ранее частицы, которые и увлекаются в кольцевую щель *б* в кожухе.

Двигатель у мотора-вентилятора электровозов ВЛ60; ВЛ80 асинхронный 40 кВт. Класс изоляции В. Ротор короткозамкнутый. Сердечник набран из листов электротехнической стали. Стержни алюминиевые. Номинальная перегрузочная способность двигателя 1,8...2,4.

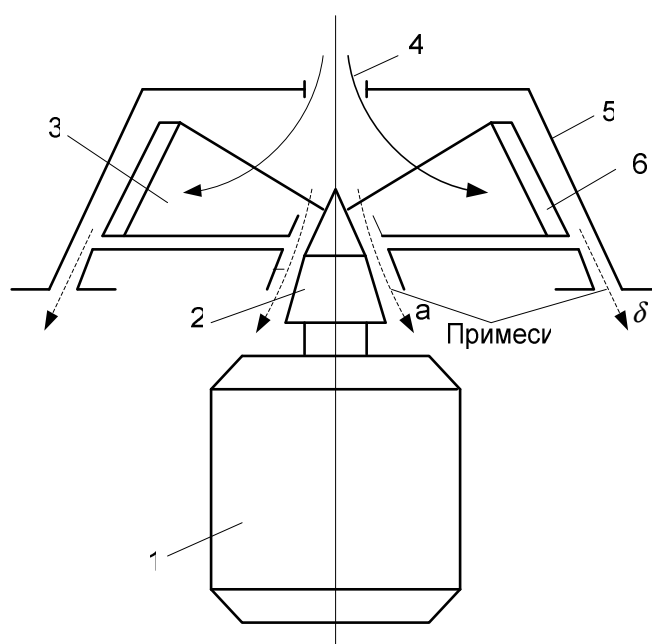


Рисунок 12.5 – Схема очистки воздуха

## 12.5 Моторы-компрессоры

В мотор-компрессорах электрическую машину и компрессор komponуют в виде одного агрегата или устанавливают на одной плите два этих устройства и сочленяют.

Необходимая мощность привода компрессора определяется исходя из давления всасываемого и нагнетаемого воздуха.

КПД электрического двигателя компрессора 0,68...0,78.

Наиболее распространенные на ЭПС мотор-компрессоры типов КТ-6 и Э500.

На подвижном составе используют компрессоры, различающиеся по скорости вращения, но все они поршневые:

- 1) тихоходные – с частотой вращения вала 250...300 об/мин;
- 2) быстроходные – до 900 об/мин.

Поскольку на электровозах и электропоездах разное давление в главных резервуарах, 10 и 8 кгс/см<sup>2</sup> соответственно, то на электропоездах применяют одноступенчатые компрессоры, сочлененные с двигателем зубчатой передачей. На электровозах применяют двухступенчатые компрессоры с охлаждающей рубашкой, сочлененные муфтой с электродвигателем.

В качестве привода могут использоваться как двигатели постоянного тока, так и асинхронные двигатели. В первом случае – затруднен пуск. В случае использования АД увеличивают величину скольжения.

## 12.6 Моторы-насосы

Наибольшее распространение получили центробежные насосы, приводимые во вращение асинхронными двигателями.

Мотор-насос марки ЭЦТ-63/10 применяется для принудительной циркуляции трансформаторного масла.

Объем перекачиваемого масла в час 63 м<sup>3</sup> при напоре 10 м водяного столба.

Для приводов вспомогательных насосов, работающих при снятии напряжения контактной сети, применяют двигатели постоянного тока, подключаемые к аккумуляторной батарее. Такие двигатели могут использоваться и вместо асинхронных.

## 12.7 Расщепители фаз

Асинхронный расщепитель фаз (рис. 12.6) представляет собой обычную асинхронную машину, выполняющую одновременно как функции однофазного двигателя, так и трехфазного генератора.

Обмотку статора выполняют в виде трехфазной несимметричной звезды с неодинаковым числом пазов на полюс и фазу.

Двигательная обмотка подключается к обмотке собственных нужд и служит для придания вращения машине. Генераторная обмотка создает третью фазу и подключается к

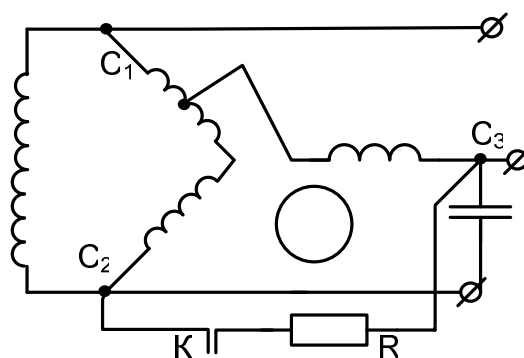


Рисунок 12.6 – Расщепитель фаз

двигательной таким образом, чтобы обеспечить наилучшую симметрию напряжений при определенной нагрузке.

При подаче на двигатель однофазного напряжения образуется пульсирующее поле которое можно разделить на две составляющие. В момент пуска эти составляющие поля равны, и вращающего момента нет. Если разогнать с помощью каких-то средств ротор до частоты вращения, близкой к номинальной, то за счет поля статора и наведенных токов в роторе и так же за счет поля ротора, вызванного этими токами, инверсная составляющая компенсируется, и создается постоянный вращающий момент.

Прямое магнитное поле пересекает генераторную обмотку и наводит в ней ЭДС.

Напряжения генераторной и двигательной обмоток образуют трехфазную систему, к которой подключаются асинхронные двигатели.

Подбором числа витков добиваются минимальной несимметрии напряжений.

Для разгона двигателя используют или специальные разгонные двигатели (устанавливались на французских электровозах Ф), или резисторы  $R$  с последующим отключением. Пусковой резистор создает дополнительный временный сдвиг постоянного и инверсного поля и тем самым позволяет создать вращающий момент.

Емкость  $C$  способствует улучшению пуска, а также уменьшает влияние индуктивностей обмоток и тем самым увеличивает симметричность напряжения.

## 12.8 Моторы-генераторы и генераторы управления

Об их назначении уже упоминалось. Используются они в цепях электровозов постоянного тока.

Так как в режиме торможения необходимо плавно регулировать напряжение, то машины выполняют с малой степенью насыщения железа.

Моторы-генераторы это по существу две машины постоянного тока на одном валу. Одна работает в двигательном режиме, другая в генераторном.

Двигатели мотор-генераторов имеют последовательное или смешанное возбуждение. Генератор имеет мощную траверсу с большим количеством щеток. Это дает возможность реализовать значительные токовые нагрузки.

В случае аварийных режимов, например, при снятии возбуждения, возможно разносное вращение двигателя, так как он остается без нагрузки. Для защиты от этого ставят реле оборотов, которое выключает двигатель при превышении определенного числа оборотов.

Генераторы служебного тока до последнего времени выполнялись на напряжение 50 В, сейчас делают и на 110 В. Они служат для питания цепей управления и подзарядки батарей.

Генераторы цепей управления приводятся во вращение двигателями вентиляторов или делителей частоты. В связи с этим частота их вращения, будет ко-

лежаться. Чтобы исключить изменение выходного напряжения, они выполняются с параллельным возбуждением. На современном этапе функции генераторов управления выполняют статические преобразователи.

### 12.9 Делители напряжения

Делитель напряжения это двухколлекторная машина, имеющая общую магнитную систему и общий сердечник якоря с двумя независимыми обмотками (рис. 12.7).

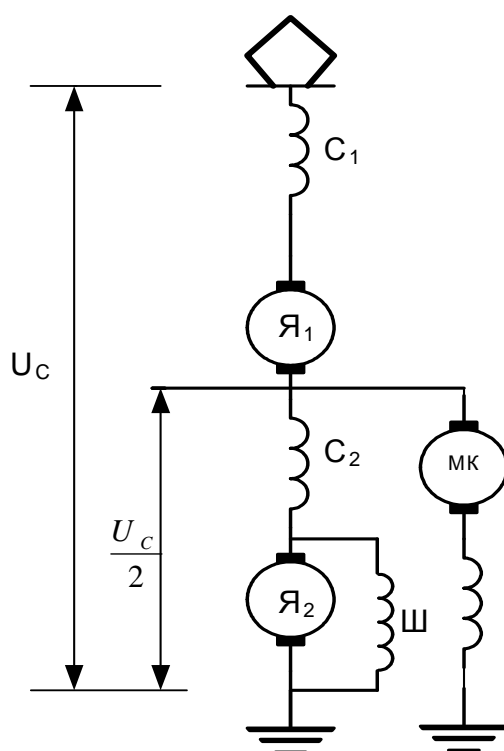


Рисунок 12.7 – Делитель напряжения

По существу делитель напряжения подобен двум машинам, включенным последовательно. К средней толке подключается нагрузка. Возбуждение машины осуществляется обмоткой Ш.

Якорь имеет волновую обмотку. Дополнительная обмотка возбуждения Ш служит для стабилизации частоты вращения и напряжения  $U_c/2$ . Это обеспечивается ее большой индуктивностью.

## 13. ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Согласно ГОСТ 2582-72 предусматривается четыре вида испытаний:

- приемосдаточные;
- типовые;
- периодические;
- ресурсные.

**Приемосдаточные испытания** проводят для проверки соответствия установленным техническим требованиям и условиям каждой изготовленной машины.

**Типовые испытания** проводят для установления номинальных и предельных данных, получения их характеристик и детальной проверки работоспособности. Обычно это делается для машин новых типов, или же при изменении конструкции, материалов, технологии изготовления и т. д. Как правило, снимают характеристики десяти машин и в качестве типовых принимают усредненные значения.

Периодические испытания машин серийного производства выполняются раз в два года или по требованию заказчика. Число машин заранее оговаривается.

Ресурсные испытания проводятся для проверки надежности и назначения ресурсов машин. Число машин в опытной партии оговаривается с заказчиком. По согласованию сторон могут быть проведены дополнительные испытания по специальному протоколу.

На приемосдаточных испытаниях проверяется:

- 1) сопротивление обмоток в холодном состоянии;
- 2) температура нагрева обмоток, коллектора, подшипников при часовом режиме;
- 3) частота вращения якоря в обоих направлениях при номинальных значениях электрических параметров ( $U$ ,  $I$  и т. д.);
- 4) испытываемая машина при повышенной частоте вращения;
- 5) электрическая прочность изоляции, ее сопротивление между токоведущими частями;
- 6) биение коллектора, коммутация и уровень вибрации.

При типовых испытаниях сначала выполняется программа приемосдаточных испытаний и кроме того:

- 1) тепловые испытания в генераторном режиме;
- 2) снимаются нагрузочные и скоростные характеристики;
- 3) определяются потери и КПД;
- 4) определяется зона наилучшей коммутации;
- 5) определяются кривые затухания главного и коммутирующего магнитных потоков;
- 6) определяется индуктивность обмоток;
- 7) определяется зависимость статического напора во входной камере машины от расхода воздуха;
- 8) проводятся испытания на влаго- и вибропрочность.

Программы периодических испытаний аналогичны программам типовых испытаний. Поскольку испытанию подвергаются мощные машины, то необходимы специальные стенды и методы испытания тяговых машин.

### 13.1 Нагрузка испытуемых машин и стенды для их испытаний

Обычно для испытаний применяют два метода:

- 1) непосредственной нагрузки;
- 2) взаимной нагрузки.

Схема при испытании по методу непосредственной нагрузки изображена на рисунке 13.1.

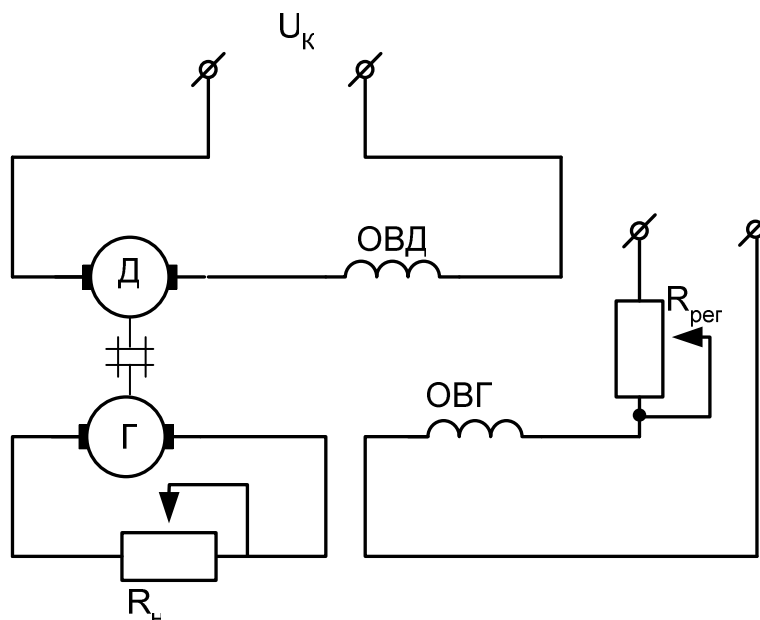


Рисунок 13.1 – Схема непосредственной нагрузки

Нагружен тяговый двигатель или другой такой же двигателем-генератором. Такая нагрузка необходима, для того чтобы не образовалось разное вращение. Это обычный недостаток двигателей последовательного возбуждения.

Регулируется нагрузка с помощью реостатов  $R_n$  и резисторов  $R_{рег}$ . Причем это в схеме изображено для простоты  $R_{рег}$ . На самом деле это могут быть тиристорные регуляторы или другие устройства, призванные обеспечить указанные задачи.

Выделенная генератором энергия гасится на резисторе  $R_{нагр}$ . Отсюда достоинства и недостатки схемы.

Достоинство – простота схемы.

Недостатки – практически вся мощность, потребляемая двигателем из сети, гасится на резисторе  $R_n$ .

Поэтому применяют схемы с взаимной нагрузкой (рис. 13.2).

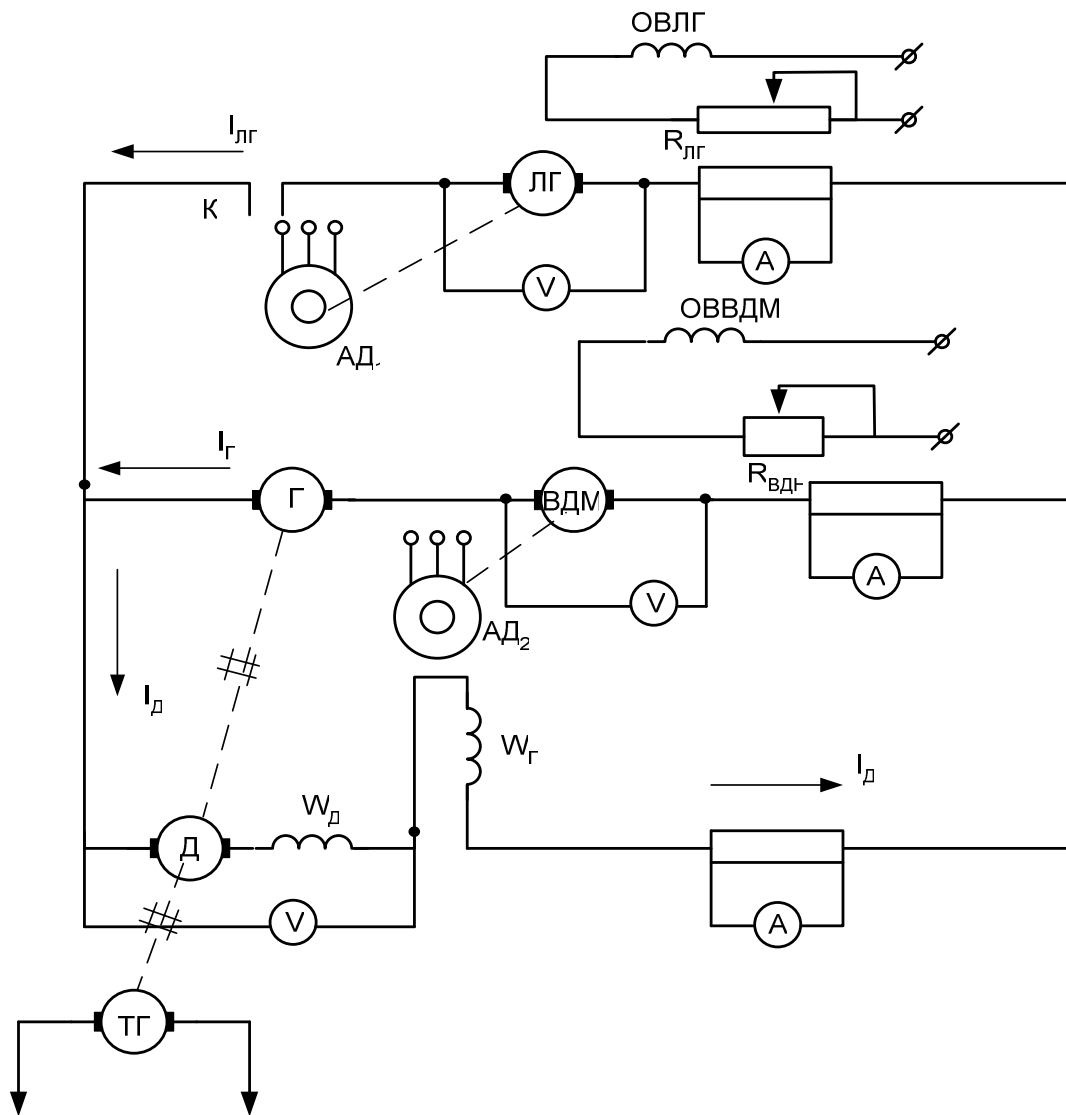


Рисунок 13.2 – Схема взаимной нагрузки:

ЛГ – линейный генератор; АД<sub>1</sub>, АД<sub>2</sub> – асинхронные двигатели;  
 RЛГ – резистор (реостат); ВДМ – вольтдобавочная машина; RВДМ – реостат;  
 ТГ – тахогенератор

Ниже приведена схема взаимной нагрузки, наиболее распространенная на заводах и депо, – это схема взаимной нагрузки с вольтдобавочной машиной.

Как уже говорилось, обычно для испытаний двигатель и генератор (Д и Г) – это одностипные машины.

Линейный генератор ЛГ – генератор с независимым возбуждением, приводящийся во вращение асинхронным двигателем АД<sub>1</sub>; RЛГ – резистор (реостат) служащий для регулирования тока возбуждения линейного генератора; ВДМ – вольтдобавочная машина – это вспомогательный генератор, который так же приводится во вращение своим асинхронным двигателем АД<sub>2</sub> (напряжение на его зажимах регулируется с помощью реостата RВДМ, который включен в цепь обмотки возбуждения ВДМ); ТГ – тахогенератор – указатель частоты вращения двигателя.



Двигатель и генератор включены встречно и поэтому при подаче напряжения от ВДМ при разомкнутом контакторе К по ним протекает одинаковый ток, но так как Д и Г – машины односторонние, якоря машин вращаться не будут.

После замыкания контактора К и возбуждения ЛГ происходит подпитка двигателя током  $I_{ЛГ}$  и отпитка генератора этим же током. Момент двигателя становится больше, чем генератора, и машины начинают медленно вращаться. Скорость их будет зависеть от разности моментов. По схеме видно, что, генератор отдает свою энергию двигателю. Ну, а поскольку «вечных двигателей» не бывает, то для компенсации потерь существуют вольтодобавочная машина и линейный генератор.

Для выяснения мощности и более детального рассмотрения функций ЛГ и ВДМ необходимо построить зависимость и рассмотреть электрическое равновесие в контуре генератор-двигатель

$$E_{ВДМ} + E_{Г} - E_{Д} = I_{Г}r_{ВДМ} + I_{Г}r'_{Г} + I_{Д}(r_{Д} + r_{ВГ}),$$

где  $r_{ВДМ}$  – сопротивление обмотки ВДМ, находящейся в цепи тока генератора;  $r'_{Г}$  – сопротивление обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки;  $r_{Д}$  – сопротивление всех обмоток двигателя;  $r_{ВГ}$  – сопротивление обмоток возбуждения генератора.

Так как  $E_{ВДМ} - I_{Г}r_{ВДМ} = U_{ВДМ}$ , то

$$U_{ВДМ} = E_{Д} - E_{Г} + I_{Г}r'_{Г} + I_{Д}(r_{Д} + r_{ВГ}).$$

Из уравнения видно, что напряжение ВДМ полностью компенсирует падение напряжения в обмотках двигателя и генератора.

Напряжение  $U_{К}$  на зажимах двигателя зависит от напряжения линейного генератора  $U_{ЛГ}$  и падение напряжения в обмотке генератора

$$U_{К} = U_{ЛГ} - I_{Д}r_{ВГ},$$

из этого уравнения

$$U_{ЛГ} = U_{К} + I_{Д}r_{ВГ},$$

мощность вольтодобавочной машины

$$P_{ВДМ} = U_{ВДМ}I_{Г} = (E_{Д} - E_{Г})I_{Г} + I_{Г}^2r'_{Г} + \Delta U_{Д}I_{Г};$$

$$I_{Г} = I_{ВДМ},$$

мощность линейного генератора

$$P_{ЛГ} = \Delta P_{Д} + \Delta P_{Г} - P_{ВДМ}$$

или

$$P_{ЛГ} = \Delta P_{Д} + \Delta P_{Г} - \left[ (E_{Д} - E_{Г})I_{Г} + I_{Г}^2r'_{Г} + \Delta U_{Д}I_{Г} \right].$$

По приведенным формулам определяются параметры схемы.

Часто на практике в депо, на заводах и в лабораториях используют статические преобразователи, выполняющие функции линейного генератора и вольтодобавочной машины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время намечается рост выпуска новых локомотивов, в том числе по типуажу и сериям. Настоящее пособие предусматривалось, в значительной мере, как пособие для студентов специальности «Электрический транспорт железных дорог» изучающих дисциплину «Тяговые электрические машины». Основной упор делался на свойства электрических машин, знание которых необходимо для инженеров, занимающихся эксплуатацией и ремонтом существующего подвижного состава. Электропоезда Российских железных дорог с коллекторными тяговыми двигателями еще долгое время будут основной тяговой силой, осуществляющей перевозки по стальным магистралям. Вместе с тем в пособии затронут ряд вопросов тяговых двигателей переменного тока. Перспективы тягового привода, безусловно, за этими машинами. Это машины, которые уже сегодня становятся основным видом тяговых двигателей на современном подвижном составе. В дальнейшем, с развитием асинхронного привода, его типизацией и широким распространением у настоящего пособия возможно продолжение. Автор надеется, что пособие окажется полезным студентам электротехнических специальностей.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин ; под ред. А.С. Курбасова. – М. : Транспорт, 1987.
2. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины ; под ред. В.И. Комарова и В.П. Умова. – М. : Энергоатомиздат, 1992.
3. Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов, Е.В. Горчаков ; под ред. Д.Д. Захарченко. – М. : Транспорт, 1992.
4. Проектирование тяговых электрических машин : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта ; под ред. М.Д. Находкина. – М. : Транспорт, 1976.
5. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л. : Энергия, 1977.
6. Давыдов, Ю.А. Тяговые электрические машины : метод. указания для выполнения курсового проекта / Ю.А. Давыдов. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 1999. – 24 с.
7. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман . – М. : Высшая школа, 1990.

*Навчальне видання*

**ПЕТРЕНКО** Олександр Миколайович  
**ДОНЕЦЬ** Олександр Вадимович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ  
з курсу

## **СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ**

*(для студентів 4 курсу всіх форм навчання, напряму підготовки  
6.050702 – Електромеханіка та слухачів другої вищої освіти)*

*(рос. мовою)*

Відповідальний за випуск *В. Ф. Далека*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2014, поз. 56Л

---

Підп. до друку 27.03.2014  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60 x 84/16  
Ум. друк. арк. 6,8  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4705 від 28.03.2014